



TESIS - TE142599

**MODIFIKASI METODE *TRAJECTORY* KRITIS
UNTUK ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN PADA
SISTEM *SMART GRID***

ISA HAFIDZ
2215201203

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo M.Eng

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017



TESIS - TE142599

**MODIFIKASI METODE *TRAJECTORY* KRITIS
UNTUK ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN PADA
SISTEM *SMART GRID***

ISA HAFIDZ
2215201203

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo M.Eng

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017

**MODIFIKASI METODE *TRAJECTORY* KRITIS UNTUK ANALISIS
KESTABILAN TRANSIEN PADA SISTEM *SMART GRID***

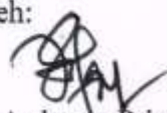
Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

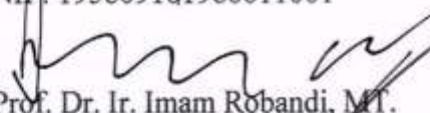
Isa Hafidz
NRP. 2215201203

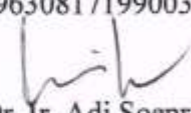
Tanggal Ujian : 6 Juni 2017
Periode Wisuda : September 2017

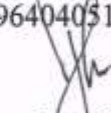
Disetujui oleh:


1. Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. (Pembimbing I)
NIP: 197309271998031004


2. Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo M.Eng (Pembimbing II)
NIP: 195809161986011001


3. Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT. (Penguji)
NIP: 196308171990031001


4. Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT. (Penguji)
NIP: 196404051990021001


5. Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT. (Penguji)
NIP: 197411292000121001



Dekan Fakultas Teknologi Elektro

Dr. Tri Arief Sardjono, S.T., M.T.
NIP. 197002121995121001

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul **“MODIFIKASI METODE TRAJECTORY KRITIS UNTUK ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN PADA SISTEM SMART GRID”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2016

Isa Hafidz
2215201203

Halaman ini sengaja dikosongkan

MODIFIKASI METODE *TRAJECTORY* KRITIS UNTUK ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN PADA SISTEM *SMART GRID*

Nama mahasiswa : Isa Hafidz
NRP : 2215201203
Pembimbing : 1. Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
2. Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery P. M.Eng

ABSTRAK

Untuk menjaga agar sistem jaringan listrik lebih stabil ketika terjadi gangguan, maka dibutuhkan analisa kestabilan transien untuk mendapatkan waktu pemutusan kritis dalam pemutusan gangguan atau dikenal dengan *Critical Clearing Time* (CCT). Pada penelitian ini diusulkan untuk menggunakan perhitungan CCT metode *trajectory* kritis dengan cara memodifikasi algoritma untuk mencari keadaan kehilangan sinkronisasi. Metode ini dihitung dari titik awal terjadinya gangguan hingga titik kehilangan sinkronisasi. Sistem *Smart Grid* merupakan jaringan sistem tenaga yang dapat dilengkapi dengan teknik dinamik optimasi dan pengukuran secara langsung untuk menjaga kualitas daya dengan mengurangi kerugian dalam saluran, meningkatkan kehandalan sistem, dan meningkatkan aset manajemen. Berdasarkan hasil simulasi pada beberapa sistem, metode yang diusulkan lebih akurat dan lebih cepat dibandingkan dengan metode konvensional, *simulation method*.

Kata kunci: *Critical clearing time* (CCT), *trajectory* kritis, kestabilan transient, *Smart Grid*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

MODIFICATION OF CRITICAL TRAJECTORY METHOD FOR TRANSIENT STABILITY ASSESSEMENT ON SMART GRID SYSTEM

By : Isa Hafidz
Student Identity Number : 2215201203
Supervisor(s) : 1. Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
2. Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery P. M.Eng

ABSTRACT

To keep the power system stability during the fault, transient stability analysis is required to obtain critical disconnection time, or known as critical clearing time (CCT). In this paper, a critical trajectory method is modified to look for loss of synchronization condition. This method is calculated from the starting point of the fault to the point of loss of the synchronization. The Smart Grid system is a power system network that can be equipped with dynamic optimization and measurement techniques directly to maintain power quality by reducing losses in the channel, improving system reliability, and to improve asset management. Based on the simulation results on some systems, the proposed method is more accurate and faster than the conventional method, simulation method.

Key words: *Critical clearing time (CCT)*, *critical trajectory* , transient stability, *Smart Grid*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbil ‘alamin, Puji syukur yang sangat mendalam kami panjatkan kehadiran Allah SWT, karena atas rahmat dan karunia-Nya yang tiada terkira penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.

Tugas akhir yang berjudul “Modifikasi Metode *Trajectory* Kritis untuk Analisis Kestabilan Transien pada Sistem Smart Grid” diajukan guna memenuhi sebagian persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Pengerjaan tugas akhir ini tentu tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Bpk. Ir. Muhammad Saechu dan Ibu Danarti Setiyowati S.Pd, orang tua penulis yang tiada lelah memanjatkan do’a, memberikan inspirasi, dan semangat untuk penulis.

2. Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo M.Eng, dan Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT., dosen yang dengan sabar membimbing penulis, memberikan dukungan dan arahan dalam mengerjakan thesis ini. Saya juga mengagumi kerja keras dan responnya ketika saya mengalami masalah.

3. Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT., Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT., Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT. Dosen penguji yang telah memberikan saya kritikan, dan saran melalui sudut pandang yang berbeda terhadap pengerjaan thesis saya ini.

3. Imam Wahyudi Farid, yang telah menginspirasi saya untuk melanjutkan studi ke jenjang magister, hingga menngajak saya ke negeri sakura. Andikta Dwi Hirlanda, Mas Onny Asrarul Qudsi, serta rekan-rekan asisten LIPIST yang telah menemani penulis dalam berdiskusi dan menggali ilmu.

4. Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) karena telah membantu saya dalam hal finansial untuk menyelesaikan studi magister.

5. Wildan Arif Febrianto, Mohamad Ridwan, Muhammad Khalil, Arief Budi Ksatria, Alfredo Gusmao, Alfin Sahrin, Annisaa Taradini, Firilia Filiana, Niken Adriaty Basyarach, Trisna Wati, *and Rachma Prillia Evin who always listen to me when I am angry, hug me when I am sad and laugh with me (or sometimes at me) whenever they can. I just wanted to say Thank You for being there for me,. And I just wanted to say I Love You.*

Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi banyak pihak. Penulis berharap pembaca dapat memberikan saran dan kritik bagi buku ini untuk menjadi perbaikan di masa mendatang.

Surabaya, Juni 2017

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Kontribusi.....	3
1.6 Metodologi Penelitian	3
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA.....	5
2.1 Kestabilan Sudut Rotor	4
2.2 Kestabilan Transien.....	4
2.3 <i>Trajectory</i> Kritis.....	6
2.4 Waktu Pemutusan Kritis.....	7
2.5 Smart Grid	7
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	9
3.1 Metode Simulasi.....	9
3.2 Perumusan Masalah.....	10
3.3 Modifikasi Persamaan Trapezoidal	11
3.4 Modifikasi Metode Hilangnya Sinkronisasi.....	13
3.5 Perumusan Minimalisasi	15
3.6 Matrik Jacobian	16
3.7 Metode Newton Raphson	17
3.8 Persamaan Ayunan	18
3.8.1 Multimesin Terhubung pada Bus Infinit.....	22

3.8.2 Multimesin Tanpa Terhubung Infinit Bus.....	23
3.9 Studi Aliran Daya	25
3.9.1 Matrik Jacobian untuk Aliran Daya.	26
3.9.2 Perhitungan Aliran Daya Menggunakan Newton Raphson.....	27
3.10 Reduksi Matriks	27
3.11 Smart Grid.	30
3.12 Diagram Alir.....	30
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS	32
4.1 Perhitungan CCT Sistem Fouad dan Anderson 3-Generator 9-Bus	32
4.1.1 Perhitungan CCT Sistem Fouad dan Anderson 3-Generator 9-Bus Menggunakan Referensi COA/COI	33
4.1.2 Perhitungan CCT Sistem Fouad dan Anderson 3-Generator 9-Bus Terhubung Bus Infinit	33
4.2 Perhitungan CCT pada Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus	39
4.2.1 Perhitungan CCT Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus Menggunakan Referensi COA/COI	40
4.2.2 Perhitungan CCT Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus Terhubung pada Bus Infinit.....	44
4.3 Perhitungan CCT pada Sistem IEEE 3-Generator 33-Bus	48
4.4 Perhitungan CCT pada Sistem IEEE 6-Generator 30-Bus	53
4.4.1 Perhitungan CCT Sistem IEEE 6-Generator 30-Bus Menggunakan Referensi COA/COI	54
4.4.2 Perhitungan CCT Sistem IEEE 6-Generator 30-Bus Terhubung pada Bus Infinit.....	62
BAB 5 KESIMPULAN	63
DAFTAR PUSTAKA.....	65
LAMPIRAN	665
DAFTAR INDEX.....	71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Respon Sudut Rotor Terhadap Gangguan Transien [10].....	5
Gambar 2.2	<i>Trajectory</i> Selama Keadaan Transient [8].....	6
Gambar 3.1	Konsep Metode Trapezoidal [8]	12
Gambar 3.3	Diagram Alir Menghitung CCT	31
Gambar 4.1	Sistem Fouad dan Anderson 3-Generator 9-Bus	32
Gambar 4.2	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan <i>rad/s</i> , Sudut Rotor (δ), Terhadap Waktu (t) Pada Gangguan di Titik “F” Sistem Fouad dan Anderson 3-Generator 9-Bus Tanpa Damping dengan Perhitungan COA.....	34
Gambar 4.3	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan <i>rad/s</i> , Sudut Rotor (δ), Terhadap Waktu (t) Pada Gangguan di Titik “F” Sistem Fouad dan Anderson 3-Generator 9-Bus Tanpa Damping dengan Perhitungan COA.....	36
Gambar 4.4	Gambar 4.4. Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan <i>rad/s</i> , Sudut Rotor (δ), Terhadap Waktu (t) Pada Gangguan di Titik “B” Sistem Fouad dan Anderson 3-Generator 9-Bus Tanpa Damping dengan Perhitungan Modifikasi Infinite Bus.....	38
Gambar 4.5	Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus Radial	39
Gambar 4.6	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan <i>rad/s</i> , Sudut Rotor (δ), Terhadap Waktu (t) Pada Gangguan di Titik “A” Sistem Fouad dan Anderson 3-Generator 16-Bus Tanpa Damping dengan Perhitungan COA.....	41
Gambar 4.7	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan <i>rad/s</i> , Sudut Rotor (δ), Terhadap Waktu (t) Pada Gangguan di Titik “A” Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus dengan Damping Perhitungan COA.....	43
Gambar 4.8	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan <i>rad/s</i> , Sudut Rotor (δ), Terhadap Waktu (t) Pada Gangguan di Titik “B” Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus Tanpa Damping dengan Perhitungan Modifikasi Terhubung Bus Infinit	45
Gambar 4.9	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan <i>rad/s</i> , Sudut Rotor (δ), Terhadap Waktu (t) Pada Gangguan di Titik “B” Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus Damping dengan Perhitungan Modifikasi Terhubung Bus Infinit.....	47
Gambar 4.10	Sistem IEEE 3-Generator 33-Bus	48
Gambar 4.11	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan <i>rad/s</i> , Sudut Rotor (δ), Terhadap Waktu (t) Pada Gangguan di Titik “B” Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus Tanpa Damping dengan Menggunakan Perhitungan COA	50

Gambar 4.12	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan <i>rad/s</i> , Sudut Rotor (δ), Terhadap Waktu (t) Pada Gangguan di Titik “B” Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus dengan Damping dengan Menggunakan Perhitungan COA	52
Gambar 4.13	Sistem IEEE 6-Generator 30-Bus	53
Gambar 4.14	Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan <i>rad/s</i> , Sudut Rotor (δ), Terhadap Waktu (t) Pada Gangguan di Titik “E” Sistem IEEE 6-Generator 30-Bus Tanpa Damping dengan Menggunakan Perhitungan COA	55
Gambar 4.15	Kondisi Stabil dan Tidak Stabil δ , ω , P_m , dan E Pada Gangguan di Titik “D” pada Modifikasi Sistem IEEE 6-Generator 30-Bus Tanpa <i>Damping</i> Terhubung pada Bus Infinit	57

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Nilai CCT pada Sistem Fouad dan Anderson 3-Generator 9-Bus Tanpa <i>Damping</i> Menggunakan Referensi COA	35
Tabel 4.2	Nilai CCT pada Sistem Fouad dan Anderson 3-Generator 9-Bus dengan <i>Damping</i> Menggunakan Perhitungan COA.....	35
Tabel 4.3	Nilai CCT pada Sistem Fouad dan Anderson 3-Generator 9-Bus Tanpa <i>Damping</i> Menggunakan Perhitungan Modifikasi Infinite Bus	37
Tabel 4.5	Nilai CCT pada Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus Tanpa <i>Damping</i> Menggunakan Referensi COA	40
Tabel 4.6	Nilai CCT pada Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus dengan <i>Damping</i> Menggunakan Referensi COA	42
Tabel 4.7	Nilai CCT pada Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus Tanpa <i>Damping</i> Terhubung pada Bus Infinit	44
Tabel 4.8	Nilai CCT pada Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus dengan <i>Damping</i> Terhubung pada Bus Infinit.....	46
Tabel 4.9	Nilai CCT pada Sistem IEEE 3-Generator 33-Bus Tanpa <i>Damping</i> Menggunakan Referensi COA	49
Tabel 4.10	Nilai CCT pada Sistem IEEE 3-Generator 33-Bus dengan penambahan <i>Damping</i> Menggunakan Referensi COA	51
Tabel 4.11	Nilai CCT pada Sistem IEEE 6-Generator 30-Bus Tanpa <i>Damping</i> Menggunakan Referensi COA	54
Tabel 4.12	Nilai CCT pada Sistem IEEE 6-Generator 30-Bus Tanpa <i>Damping</i> Terhubung pada Bus Infinit	56
Tabel 4.13	<i>Error</i> dan Kecepatan Rata-rata pada Perhitungan CCT Sistem IEEE 3-Generator 9-Bus	45
Tabel 4.14	<i>Error</i> dan Kecepatan Rata-rata pada Perhitungan CCT Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus	58
Tabel 4.15	<i>Error</i> dan Kecepatan Rata-rata pada Perhitungan CCT Sistem IEEE 3-Generator 33-Bus	59
Tabel 4.16	<i>Error</i> dan Kecepatan Rata-rata pada Perhitungan CCT Sistem IEEE 6-Generator 30-Bus	59

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN

CCT	= <i>Critical Clearing Time</i>
UEP	= <i>Unstable Equilibrium Point</i>
CB	= <i>Circuit Breaker</i>
k	= Perubahan angka terhadap waktu
t	= Waktu
S	= Posisi titik awal <i>trajectory</i> ketika sistem terjadi gangguan
t^k	= Waktu pada lintasan <i>trajectory</i>
R	= Bilangan real
R^N	= Bilangan real terhadap perubahan waktu
N	= Perubahan waktu
X_F	= Nilai inisialisasi ketika gangguan
$x(t)$	= Nilai jarak akhir <i>trajectory</i> setelah terjadi gangguan
x^0	= Nilai jarak awal pada <i>trajectory</i> setelah terjadi gangguan
\dot{x}	= Nilai turunan dari x
x_{pre}	= Kondisi sistem sebelum terjadi gangguan
x_{post}	= Kondisi sistem setelah terjadi gangguan
∞	= Bilangan tak hingga
τ	= Waktu dari awal hingga akhir pada persamaan <i>trajectory</i>
x^m	= Jarak pada persamaan trapezoidal konvensional pada titik m
x^{m+1}	= Jarak pada persamaan trapezoidal akibat perubahan waktu
x^k	= Jarak pada persamaan trapezoidal konvensional pada titik k
x^{k+1}	= Jarak persamaan trapezoidal konvensional akibat waktu
x^u	= Waktu dirubah menjadi jarak pada trapezoidal konvensional
ε	= Jarak pada lintasan trapezoidal konvensional
x^k	= Nilai waktu yang dirubah menjadi jarak pada persamaan <i>trajectory</i>
\dot{x}^k	= Turunan nilai dari waktu yang dirubah menjadi jarak pada persamaan <i>trajectory</i>
$f(x^k)$	= Jarak lintasan pada persamaan <i>trajectory</i>
ω	= Kecepatan generator (rad/detik)

$\tilde{\omega}$	= Kecepatan generator berubah terhadap waktu (rad/detik)
θ	= Sudut rotor (rad)
$G(X)$	= Hasil perhitungan metode <i>Newton Raphson</i>
X_s	= Hasil perhitungan dari persamaan $G(X)$
X_0	= Nilai awal dari hasil perhitungan X_s
ΔX	= Batas error pada proses perhitungan X_s
J	= Matrik <i>Jacobian</i>
W	= Matrik absolut berbentuk persegi yang diagonal positif
H	= Konstanta Inersia dalam satuan per unit
H_{ij}	= Perubahan daya aktif terhadap sudut δ
N_{ij}	= Perubahan daya aktif terhadap tegangan
J_{ij}	= Perubahan daya reaktif terhadap sudut
L_{ij}	= Perubahan daya reaktif terhadap tegangan.
v	= <i>Eigenvector</i>
X_d	= Reaktansi di generator
X_i	= Reaktansi di saluran
X	= Reaktansi total
$E \angle \theta$	= Tegangan dan sudut di generator
$E_b \angle \theta$	= Tegangan dan sudut di <i>infinite bus</i>
V_b	= Tegangan di sisi b
X_d	= Reaktansi di sisi d
X_q	= Reaktansi di sisi q
X_l	= Reaktansi di sisi l
V_t	= Tegangan di sisi t
I	= Arus pada sistem
P_m	= Daya mekanis generator
P_e	= Daya elektris generator
ω_i	= Kecepatan sudut generator
ω_s	= Kecepatan base
ω_m	= Referensi gerak berputar sinkron
θ_m	= Perpindahan angular rotor terhadap axis stasioner stator

θ_i	= Sudut fasa internal
M_i	= Konstanta inersia
P_{m_i}	= Input mekanis
P_{e_i}	= Daya output elektrik
P_i	= Daya aktif dari generator ke i
Q_i	= Daya reaktif dari generator ke i
D	= Konstanta kontrol
Y_{ij}	= Admitansi elemen matrik
E_i dan E_j	= Tegangan internal dari generator pada metode simulasi
α_{ij}	= Konstanta
V_G	= Tegangan bus generator
S	= Daya Semu
E_a	= Tegangan generator
A	= Titik gangguan antara bus 1 dan bus 4, dekat bus 1
B	= Titik gangguan antara bus 2 dan bus 7, dekat bus 2
C	= Titik gangguan antara bus 3 dan bus 9, dekat bus 3
D	= Titik gangguan antara bus 4 dan bus 5, dekat bus 4
E	= Titik gangguan antara bus 4 dan bus 6, dekat bus 4
F	= Titik gangguan antara bus 5 dan bus 7, dekat bus 7
G	= Titik gangguan antara bus 7 dan bus 8, dekat bus 7
H	= Titik gangguan antara bus 6 dan bus 9, dekat bus 9
I	= Titik gangguan antara bus 8 dan bus 9, dekat bus 9

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kestabilan sistem tenaga adalah kemampuan sistem tenaga, pada kondisi operasi tertentu, untuk mempertahankan kondisi operasinya setelah mengalami sebuah gangguan, dengan merujuk pada beberapa batasan sehingga sistem dapat kembali dalam kondisi stabil [1]. Kestabilan sudut rotor menjadi pokok bahasan utama dalam mengamankan operasi sistem tenaga. Analisis menggunakan simulasi numerik secara bertahap, yang dimulai dari inisialisasi titik awal untuk mendapatkan respon dinamis dari gangguan. Penggunaan simulasi numerik dianggap efektif karena dapat dengan mudah menghitung model yang berubah ubah untuk sistem tenaga yang rumit [2]. Metode numerik memiliki kekurangan yaitu lebih membutuhkan banyak waktu dalam perhitungannya sehingga tidak cocok apabila diterapkan pada perhitungan secara *real time*.

Pendekatan alternatifnya adalah menggunakan metode *energy function* [3]-[4]. Metode tersebut dapat menentukan kualifikasi kestabilan dengan cepat, namun memiliki kekurangan dalam hal akurasi. Masalah akurasi disebabkan oleh penentuan hasil perhitungannya yang rumit karena membutuhkan perhitungan *critical energy*.

Pertimbangan selanjutnya adalah mengenai kestabilan transient. Kestabilan transien berhubungan dengan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi sinkron akibat gangguan transient [5].. Respon pada sistem dapat mempengaruhi besarnya penyimpangan pada sudut rotor generator. Hal tersebut dipengaruhi oleh hubungan nonlinear sudut dayanya. Kestabilan transien bergantung pada operasi inisial pada sistem dan kerasnya gangguan. Gangguan dapat menyebabkan perbedaan inisial operasi sistem bila dibandingkan dengan sebelum dan sesudah gangguan. Ketidakstabilan adalah penyimpangan yang tidak linier sebagai akibat ketidakmampuan torsi untuk sinkron pada saat ayunan pertama. Namun, pada jenis sistem *multi machine*, kestabilan transien tidak selalu terjadi pada ayunan pertama. Hal tersebut dapat disebabkan oleh

bertambahnya puncak deviasi akibat superposisi beberapa osilasi yang disebabkan penyimpangan sudut rotor pada ayunan pertama.

Batas waktu untuk kestabilan transien pada dibatasi mulai dari 3 hingga 5 detik setelah terjadinya gangguan. Hal tersebut bisa bertambah hingga 10 detik pada sistem yang lebih besar dengan dominan area ayunan. Kestabilan transient dikategorikan sebagai fenomena jangka pendek. Sistem tenaga dapat mengalami variasi gangguan yang luas, sehingga sistem tersebut perlu dirancang untuk berbagai macam kemungkinan gangguan juga dengan mempertimbangkan faktor ekonomi.

Untuk sistem pendeteksian online, seperti pada sistem *Smart Grid*, perhitungan kestabilan, pemilihan generator, dan pengiriman informasi membutuhkan waktu sekitar 150 milidetik setelah terjadinya gangguan. Konsep sistem *Smart Grid* dirancang untuk meningkatkan keamanan, keekonomisan, dan efisiensi sehingga kerumitan pengoprasian sistem tenaga listrik dapat teratasi [6]. Oleh sebab itu diperlukan metode yang dapat menentukan CCT dengan perhitungan yang cepat.

1.2 Rumusan Masalah

Pada penelitian ini yang menjadi permasalahan utama adalah mendapatkan CCT pada sistem multimesin di *smart grid* dengan memodifikasi persamaan hilang sinkronisasi .

1.3 Tujuan

Kontribusi dari hasil penelitian akan diperoleh suatu metode baru untuk menentukan CCT dengan waktu integrasi yang lebih cepat dan akurat, sehingga dapat memberikan gambaran kestabilan transien pada sebuah sistem. Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Mengusulkan sebuah metode baru untuk mendapatkan CCT dengan memodifikasi persamaan *Lossing of Synchronization* pada *trajectory* kritis.
2. Mendapatkan nilai CCT secara langsung pada model generator pada sistem *smart grid* yang memiliki saluran tunggal (*single circuit*).

1.4 Batasan Masalah

Kontribusi dari hasil penelitian akan diperoleh suatu metode baru untuk menentukan CCT dengan waktu integrasi yang lebih cepat dan akurat, sehingga dapat memberikan gambaran kestabilan transien pada sebuah sistem *smart grid* dengan saluran tunggal (*single circuit*).

1.5 Kontribusi

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Mengusulkan sebuah metode baru untuk mendapatkan CCT dengan memodifikasi persamaan *Lossing of Synchronization* pada *trajectory* kritis.
2. Mendapatkan nilai CCT secara langsung pada model generator pada sistem *smart grid*.

1.6 Metodologi Penelitian

Garis besar dan isi dari penelitian ini dapat diringkas:

Bab 1 Pengenalan pada latar belakang dari gambaran umum mengenai kestabilan transien.

Bab 2 Menjelaskan mengenai definisi *trajectory* kritis, CCT, dan gangguan hubung singkat pada sistem tenaga.

Bab 3 Mendeskripsikan tentang bagaimana metode kehilangan sinkronisasi bersama dengan *trajectory* kritis, studi aliran daya, perhitungan matrik *jacobian*, dan pemodelan sistem *Smart Grid*.

Bab 4 Hasil simulasi dan analisis data dari modifikasi metode *trajectory* kritis hilangnya sinkronisasi

Bab 5 Kesimpulan

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Kestabilan Sudut Rotor

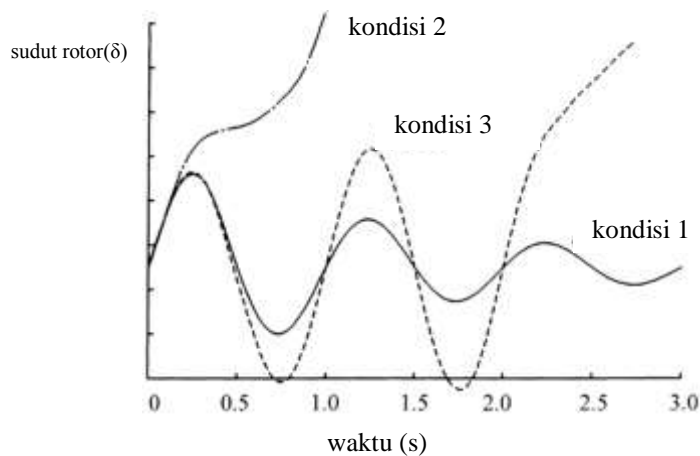
Kestabilan sudut rotor berhubungan dengan kemampuan mesin sinkron yang terhubung pada sistem untuk tetap dalam keadaan sinkron setelah mengalami gangguan. Hubungan tersebut dipengaruhi torsi elektromagnetik dan torsi mekanis dari mesin. Sistem tenaga listrik beroperasi pada lingkungan yang terus berubah sehingga dapat menyebabkan sistem tersebut tidak linier. Contohnya adalah seperti adanya perubahan beban, perubahan output generator, dan hal lain yang berubah secara terus-menerus. Sifat dari sudut daya adalah tidak linier. Pertambahan perbedaan dari sudut daya akan diikuti oleh berkurangnya daya yang dihasilkan oleh mesin. Keadaan tidak stabil akan muncul jika sistem tidak dapat menyerap energi kinetik akibat adanya perbedaan kecepatan pada rotor. Oleh sebab itu ketidaksetimbangan dapat menyebabkan bertambahnya sudut angular dari ayunan pada beberapa generator akibat kondisi *loss of synchronism* dari generator yang lain [7]. Untuk memudahkan dalam menganalisa kestabilan sudut rotor, maka perlu dilakukan klasifikasi menurut jenis gangguannya, yaitu akibat gangguan kecil dan akibat gangguan besar.

Kestabilan rotor akibat gangguan kecil dapat berpengaruh pada bertambahnya sudut rotor secara tidak periodik, dan meningkatnya amplitud akibat torsi damping yang tidak sesuai. Masalah tersebut dapat bertambah luas ketika osilasi sebuah grup dari generator mempengaruhi grup generator yang lain sehingga dinamakan *interarea mode oscillation*. Periode waktu dari gangguan kecil adalah dalam rentang waktu 10-20 detik setelah gangguan.

2.2 Kestabilan Transien

Kestabilan rotor akibat gangguan besar atau dinamakan kestabilan transient menjelaskan mengenai kemampuan sistem untuk kembali sinkron ketika terjadi gangguan besar, seperti hubung singkat pada saluran transmisi. Respon sistem

dipengaruhi kondisi operasi awal sistem dan besarnya gangguan. Ketidakstabilan tersebut dapat menyebabkan berubahnya sudut rotor secara tidak periodik akibat torsi yang tidak sinkron dan menghasilkan *first swing instability* pada ayunan pertama. Apabila gangguan tersebut terjadi pada sistem yang besar, kondisi tidak sinkron dapat muncul pada beberapa ayunan setelah gangguan. Hal tersebut dikarenakan efek nonlinier dan superposisi antar area pada sistem.



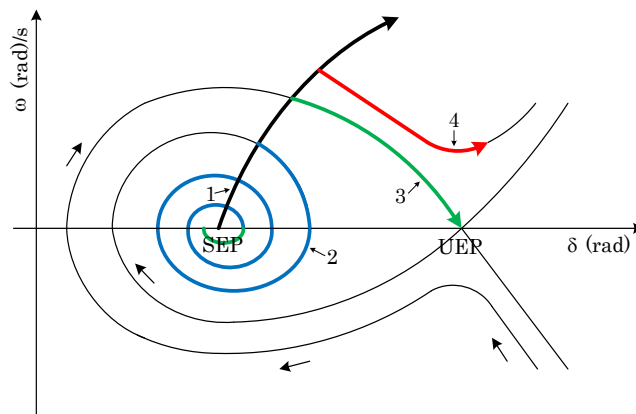
Gambar 2.1. Respon Sudut Rotor Terhadap Gangguan Transien[10].

Gambar 2.1 menunjukkan kondisi stabil dan tidak stabil pada generator sinkron. Pada kondisi stabil yaitu kondisi 1, sudut rotor bertambah hingga maksimum, akan tetapi kemudian berkurang dan berosilasi hingga pada kondisi *steady-state*. Namun pada kondisi 2 (*frist swing instability*), sudut rotor terus bertambah sehingga generator kehilangan sinkronisasinya (*lossing of synchronization*). Sedangkan pada kondisi 3 (*multi swing instability*), osilasi yang semakin bertambah mengakibatkan generator menjadi lepas sinkron [10].

2.3 Trajectory kritis

Gambar 2.2 menunjukkan diagram konstektual dari kestabilan transient pada sistem tenaga tanpa menggunakan damping. Sudut horizontal menjelaskan sudut fasa dari generator, dan sumbu vertikal menjelaskan frekuensi angular. Ketika sistem beroperasi dalam keadaan stabil, titik operasinya terletak pada daerah *stable equilibrium point* (SEP), dan sistem pada kondisi ini sifatnya stabil (titik S). Akan tetapi ketika terjadi gangguan di sistem, keadaan sistem bergerak dari stable

equilibrium point dengan mengikuti locus trajectory (trajectory 1). Jika gangguan selesai dalam waktu yang singkat, maka titik operasinya akan beresilasi (trajectory 2). Akan tetapi, jika waktu gangguan sangat lama, maka sistem tidak dapat kembali pada kondisi awal setelah terjadinya gangguan (trajectory 4). Jika gangguan berhasil ditangani sebelum waktu kritisnya (trajectory 3) yang terletak pada unstable equilibrium point (UEP), maka trajectory akan kembali, dan titik operasinya konvergen pada waktu yang tidak terhingga. Metode tersebut adalah metode yang efisien dalam menentukan trajectory kritis [11]



Gambar 2.2 *Trajectory* selama Keadaan Transient [8]

Pada kasus single machine, trajectory kritis dapat mencapai UEP. Trajectory kritis didefinisikan sebagai trajectory yang dimulai dari sebuah titik gangguan dan mencapai titik kritis yang memenuhi kondisi hilangnya sinkronisasi. Titik kritis tersebut berhubungan dengan UEP untuk sistem single machine sesuai yang digambarkan pada Gambar 2.1, bukan untuk kasus multimachine. Hal tersebut sulit untuk dikerjakan dengan metode simulasi perhitungan konvensional. Dengan menggunakan metode konvensional, kondisi sistem dapat dijelaskan dengan presisi, dan analisis model dapat disimulasikan menggunakan kontrol sehingga lebih mendekati kondisi realnya. Pada penelitian ini, perhitungan pada problem tersebut disingkat dengan pengecekan kondisi inisialnya.

Sistem tenaga listrik *Smart Grid* terdiri dari sistem pembangkitan, sistem transmisi, dan beban. Secara umum sistem pembangkitan *Smart Grid* terdiri dari generator dan beban, atau generator tersebut terhubung pada *Infinite Bus*. Sistem

ini terdiri dari jaringan listrik kecil yang lengkap dengan pembangkit, beban, dan pengaturannya. *Smart Grid* bisa berdiri sendiri atau tersambung dengan jaringan listrik besar.

2.5. Waktu Pemutusan Kritis

Sistem akan kembali stabil jika gangguan ditangani dengan membuka CB sebelum waktu pemutusan kritis atau dikenal dengan *critical clearing time* (CCT), kemudian sistem menjadi tidak stabil bila gangguan ditangani setelah waktu tersebut. Gangguan pada sistem tenaga listrik dapat diamankan dengan pemutusan saluran atau pelepasan generator melalui *circuit breaker* (CB). Waktu kerja rele: Waktu buka CB 0,04–0,1 detik (2-5 cycle), *Overtravel* dari rele 0.1 detik, dan Faktor keamanan 0.12–0.22 detik. Untuk rele berbasis *microprocessor overtravel* time dari rele diabaikan. Total waktu yang diperlukan adalah 0.2–0.3 detik [9] sehingga peralatan pada sistem akan teramankan dari kerusakan. Akan tetapi, skema ini tidak menjamin sistem akan kembali pada kondisi steady-state disebabkan nilai CCT pada sistem tenaga listrik. Oleh sebab itu, perlu dilakukan analisa perhitungan CCT secara akurat dan cepat untuk meningkatkan realibilitas sistem.

2.6 *Smart Grid*

Smart Grid merupakan jaringan *self-healing* yang dilengkapi dengan teknik dinamik optimasi dan pengukuran *real time* untuk menjaga kualitas daya dengan mengurangi *losses*, menjaga level tegangan, meningkatkan aset manajemen dan meningkatkan kehandalan sistem [6]. Sistem ini dapat membantu keperluan penggunaannya, dengan cara pengaturan *distributed generation* (DG), manajemen ketersediaan, serta sistem *energy storage*.

Distributed Generation (DG) memiliki keunggulan diantaranya yaitu dapat mensuplai beban dasar, beban puncak, dapat juga sebagai pembangkit cadangan, menaikkan tegangan stabilitas jaringan. DG pada sistem tersebut menggunakan sumber energi terbarukan (*renewable energy*) yaitu *Micro Hydro* sebagai sumber pembangkit listrik. Daya yang mampu dibangkitkan oleh sebuah DG adalah 30-300kW.

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Simulasi

Metode yang digunakan untuk menghitung dan menentukan kestabilan sistem berdasarkan perilakunya. Pada metode ini, keadaan sistem dapat direpresentasikan dengan presisi, dan analisis dari model yang digunakan sebagai model pembandingnya. Namun, model simulasi dapat menggunakan waktu perhitungan yang lebih lama, bergantung pada kerumitan dan skala dari sistem. Kemudian, waktu penanganan gangguan harus diatur sebelumnya, dan kestabilan dan ketidakstabilan pada titik tersebut harus ditentukan, sehingga tidak pasti. Pada umumnya, keadaan kritis harus dihitung agar dapat menemukan margin kestabilan. Pada perumpamaan, waktu penanganan gangguan diatur berdasarkan trial dan error, dan simulasi ini perlu diulang beberapa kali. Persamaan untuk menjelaskan model sistem dapat dituliskan :

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_s \quad (3.1a)$$

$$\frac{M}{\omega_s} \dot{\omega} = P_m - \frac{EV_b}{X} \sin \delta - \frac{d}{\omega_s} (\omega - \omega_s) \quad (3.1b)$$

$$\dot{E} = \frac{1}{T_{AVR}} [(E_0 - E) + K_{AVR} (V_{ref} - V_t)] \quad (3.1c)$$

$$\dot{P}_m = \frac{1}{T_{GOV}} \left[(P_{mref} - P_m) + K_{GOV} \frac{(\omega_s - \omega)}{\omega_s} \right] \quad (3.1d)$$

Parameter dari mesin untuk contoh sistem *single machine to infinite bus* dapat dijelaskan sebagai berikut:

$M = 0.5$, $X = x_d' + x_l$, $x_d' = 0.2$, $x_l = 0.1$ (pre-fault), $V_b = 1.0$, $d = 0.05$, $K_{AVR} = 10$, $T_{AVR} = 1$, $K_{GOV} = 20$, $T_{GOV} = 1$, $E = 1.1$, $\omega = 100\pi$, $P_m = 0.85$

Substitusikan rangkaian ekivalen ketika sistem mengalami hubung singkat ke dalam (3.1c) dengan mengasumsikan $\dot{E} = 0$. State variable vector untuknya dapat dituliskan seperti berikut:

$$x = [\delta \ \omega \ E \ P_m]^T$$

Pada perhitungan ini, gangguan 3-L-G terjadi pada sebuah line transmisi pada saat $t = 0$, gangguan dihilangkan dengan memutus saluran pada $t = \tau$. Kemudian, CCT akan dievaluasi dengan menganalisa kondisi sistem sebelum gangguan. Analisisnya akan digunakan oleh proposed method dan metode konvensional. ω_i adalah kecepatan sudut generator, ω_s adalah sudut kecepatan base, θ adalah sudut fasa internal, M_i adalah konstanta inersia, P_{m_i} adalah input mekanis, P_{e_i} adalah daya output elektrik, D adalah konstanta kontrol, Y_{ij} adalah admitansi elemen matrik, E_i dan E_j adalah tegangan internal dari generator, α_{ij} adalah konstanta.

3.2 Perumusan Masalah

Masalah kestabilan transien ketika terjadi gangguan dapat dijelaskan: Kondisi awal sistem beroperasi pada keadaan stabil x_{pre} . Waktu ketika awal terjadinya gangguan $t = 0$, kemudian sistem berubah secara dinamis $[0, \tau]$. Keadaan tersebut dapat dituliskan :

$$\dot{x} = f(x), \quad 0 \leq t \leq \tau, \quad x(0) = x_{pre} \quad (3.1)$$

Untuk keadaan $x \in R^n, t \in R, f_F: R^n \rightarrow R^n$

Persamaan (3.2) dinamakan *trajectory* pada gangguan, sedangkan pada penelitian ini dijelaskan dengan

$$x(t) = X_F(t; x_{pre}), \quad 0 \leq t \leq \tau \quad (3.2)$$

Untuk keadaan $X_F(\cdot; x_{pre}): R \rightarrow R^n$ dan gangguan dihilangkan pada waktu τ .

Keadaan sistem setelah terjadinya gangguan, dijelaskan dengan persamaan nonlinier :

$$\dot{x} = f(x), \tau \leq t \leq \infty; f: R^N \rightarrow R^N \quad (3.1)$$

Solusi dari Gambar 3.3 digambarkan pada lintasan trajectory kritis yang dapat dijelaskan dengan

$$x(t) = X(t; x^0), \tau \leq t \leq \infty; X(\cdot; x^0 : R^N \rightarrow R^N) \quad (3.3)$$

Titik inisial x^0 adalah titik gangguan pada trajectory pada waktu τ , waktu terjadinya gangguan :

$$x^0 = X_F(\tau; x_{pre}), \tau = CCT \quad (3.4)$$

3.3 Modifikasi Persamaan Trapezoidal

Pada modifikasi persamaan trapezoidal, waktu t^k dinotasikan x^k . Persamaan selanjutnya menggunakan menggunakan persamaan trapezoidal konvensional.

$$x^{k+1} - x^k = \frac{1}{2}(\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k)(t^{k+1} - t^k) \quad (3.5)$$

$$\text{Dimana } \dot{x}^k = f(x^k)$$

Notasi k merepresentasikan perubahan angka terhadap waktu. Sesuai yang dijelaskan sebelumnya, fokus permasalahannya adalah trajectory kritis, kemudian gangguan pada sistem hilang pada CCT. Selanjutnya variabel variabel pada keadaan setelah gangguan akan berubah, dan berkaitan dengan titik kritisnya. Pada beberapa kasus, titik kritis berhubungan dengan UEP dan *trajectory* mencapai UEP dengan batas waktu tidak terhingga.

Dimisalkan adalah ketika ada sebuah bola bergerak menuju titik puncak pada mangkuk (UEP). Pada keadaan tersebut energi kinetiknya sama dengan energi potensial. Bola tersebut tidak dapat mencapai UEP karena batas waktunya terbatas, sedangkan kecepatannya belum nol. Untuk kasus seperti itu, maka diperlukan waktu yang lebih lama atau bahkan tidak terhingga. Hal tersebut dijelaskan pada teori sistem yang sifatnya non-linier [11]. Batas kestabilan dikarakteristikan terdiri

dari bagian stabil, yang konvergen pada bagian UEP, dengan kata lain titik kritisnya terletak di daerah yang stabil. Jika gangguannya hilang ketika waktu kritis, agar memperoleh hasil yang optimal, maka perhitungan titik operasinya harus konvergen di daerah UEP. Proses perhitungan tersebut membutuhkan waktu yang lama. Untuk menyelesaikan permasalahan tersebut, maka diperlukan metode baru untuk perhitungan numeriknya.

Pertama, diperlukan persamaan (3.6) yang mendefinisikan jarak antara dua buah titik.

$$\varepsilon = |x^{k+1} - x^k| = \frac{1}{2} |\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k| (t^{k+1} - t^k) \quad (3.6)$$

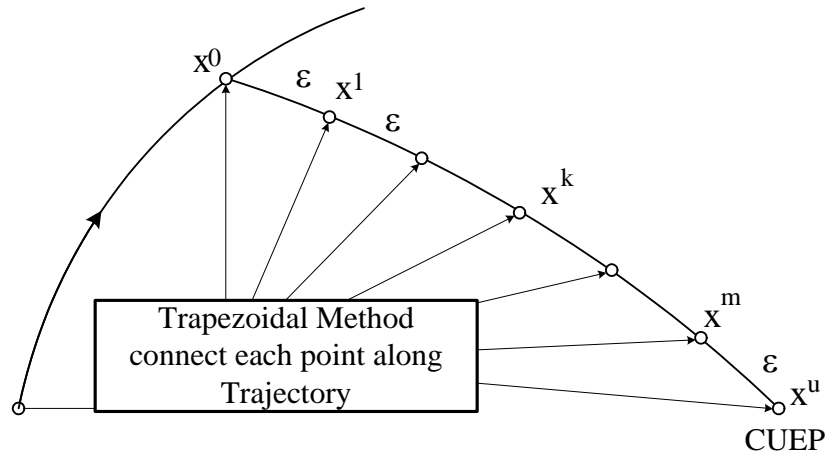
Kemudian, durasi waktunya dirubah menjadi jarak dengan

$$t^{k+1} - t^k = \frac{2}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \varepsilon \quad (3.7)$$

Selanjutnya persamaan (3.7) disubstitusikan ke (3.6)

$$x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \varepsilon = 0 \quad (3.8)$$

Pada persamaan (3.8), integrasi numerik terhadap waktu ditransformasikan kedalam jarak menggunakan metode *runge-kutta* orde 4. Prinsipnya adalah mengintegrasikan perhitungan. Oleh sebab itu dengan ditemukannya transformasi ini, maka memungkinkan untuk menjelaskan *trajectory* kritis dengan titik yang terbatas dengan jarak yang sama, seperti yang dijelaskan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Konsep Metode Trapezoidal [8]

Pada Gambar 3.1, kondisi batas diartikan sebagai kondisi titik inisial, dan x^0 , dan 'end point condition', x^u . Nilai x^0 memiliki nilai yang sama pada berbagai metode, sedangkan x^u berbeda sesuai dengan metode yang digunakan. Selanjutnya, kondisi setelah gangguan diputus dapat dituliskan sesuai persamaan (3.9).

$$x^0 = X_F(CCT, x_{pre}) \quad (3.9)$$

Sehingga variable yang perlu dihitung adalah

$$X = (x^0, x^1, \dots, x^m, x^{m+1}, \varepsilon, \tau,)$$

3.4 Modifikasi Metode Hilangnya Sinkronisasi

Pada Gambar 2.1, trajectory kritis konvergen terhadap UEP untuk sistem single machine yang terhubung pada infinite bus. Akan tetapi, hal ini bukanlah kasus tidak umum. Pada bagian ini, kondisi kritis untuk sinkronisasi yang dapat digunakan pada sistem multimesin. Diketahui pada kasus single machine bahwa gaya sinkron akan hilang ketika $\partial T / \partial \theta = 0$ atau $\partial P / \partial \theta = 0$. T dan P secara berturut turut adalah torsi sinkronisasi dan daya, sedangkan θ adalah sudut rotor. Penjabaran kondisi untuk kasus multimesin dapat dituliskan berdasarkan matriks koefisien sinkronisasi :

$$0 = \left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right] \cdot v \quad (3.10)$$

Dengan $|v| \neq 0$ dan $v \in R^{N_{Gen}}$ merupakan eigenvector yang berhubungan dengan nilai matriks *zero eigenvalue* $[\partial P / \partial \theta] \in R^{N_{Gen} \times N_{Gen}}$. N_{Gen} adalah jumlah dari generator. Diasumsikan bahwa kondisi *eigenvector* harus sesuai dengan arah perubahan θ . Dengan nilai $k_s \in R$ maka nilai *eigenvector* didapatkan melalui persamaan berikut

$$v = k_s \cdot \dot{\theta} \quad (3.11)$$

Persamaan (3.10) dan (3.11) berhubungan dengan *end point* pada *trajectory* kritis. Sebuah persamaan yang merepresentasikan kondisi stasioner untuk torsi dan daya sinkronisasi dapat dituliskan sebagai berikut $\dot{P} = 0$ dengan \dot{P} adalah fungsi dari rotor generator, dengan persamaan

$$\dot{P} = \frac{\partial P}{\partial \theta} \cdot \dot{\theta} \quad (3.12)$$

Dalam metode modifikasi hilangnya sinkronisasi, penentuan nilai *end point*, nilai dan arah *eigenvector* dari θ terhadap posisi UEP tidak dipertimbangkan, sehingga nilai konstanta θ dan k yang merupakan parameter nilai dalam *eigenvector* tidak dipertimbangkan dalam proses perhitungan selanjutnya.

Dalam penentuan elemen matriks Jacobian yang akan dijadikan sebagai salah satu parameter, dalam perhitungan CCT secara langsung bergantung pada jenis metode yang digunakan. Untuk metode modifikasi hilangnya sinkronisasi, elemen dalam matriks jacobian didefinisikan melalui beberapa persamaan berikut :

$$\begin{aligned} P^{m+1} &= Pm_i^{m+1} - Pe_i^{m+1}(\theta) \\ P^{m+1} &= Pm_i^{m+1} - \sum_{j=i}^n Y_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \cos(-\theta_i^{m+1} + -\theta_j^{m+1} + \alpha_{ij}^{m+1}) \\ P^{m+1} &= Pm_i^{m+1} - \sum_{j=i}^{NG} \left[Y_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \cos(\theta_i^{m+1} - \theta_j^{m+1}) \cos(\alpha_{ij}^{m+1}) \right. \\ &\quad \left. + Y_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \sin(\theta_i^{m+1} - \theta_j^{m+1}) \sin(\alpha_{ij}^{m+1}) \right] \\ P^{m+1} &= Pm_i^{m+1} - \sum_{j=i}^{NG} \left[G_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \sin(\theta_i^{m+1} - \theta_j^{m+1}) \right. \\ &\quad \left. + B_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \cos(\theta_i^{m+1} - \theta_j^{m+1}) \right] \end{aligned}$$

$$P^{m+1} = P_i^{m+1} - G_{ii}^{m+1}(E_i^{m+1})^2 - \sum_{j=1, j \neq i}^{NG} \sum_{j=1, j \neq i}^{NG} [G_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \sin \theta_{ij}^{m+1} + B_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \cos \theta_{ij}^{m+1}] \quad (3.13)$$

$$J_1 = \frac{\partial P_i^{m+1}}{\partial \theta_j^{m+1}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1^{m+1}}{\partial \theta_1^{m+1}} & \cdots & \frac{\partial P_1^{m+1}}{\partial \theta_{NG}^{m+1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_{NG}^{m+1}}{\partial \theta_1^{m+1}} & \cdots & \frac{\partial P_{NG}^{m+1}}{\partial \theta_{NG}^{m+1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_{NG} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Nilai dari masing masing bagiannya adalah

$$\frac{\partial P_i^{m+1}}{\partial \theta_j^{m+1}} = - \sum_{j=1, j \neq i}^{NG} [G_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \sin(\theta_i^{m+1}) + B_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \cos(\theta_i^{m+1})]$$

$$\frac{\partial P_i^{m+1}}{\partial \theta_j^{m+1}} = G_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \sin \theta_{ij}^{m+1} - B_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \cos \theta_{ij}^{m+1}$$

Kemudian turunan dari matriks J_1 dapat ditulis

$$\partial J_1 = \frac{\partial J_1}{\partial \theta} + \frac{\partial J_1}{\partial \dot{\theta}} \quad (3.15)$$

Dimana

$$\frac{\partial J_1}{\partial \theta} = \frac{\partial J \left(\frac{\partial P_{m+1}}{\partial \theta^{m+1}} \right)}{\partial \theta_i^{m+1}} \cdot \dot{\theta}$$

$$\frac{\partial J_1}{\partial \dot{\theta}} = \frac{\partial P_{m+1}}{\partial \theta^{m+1}}$$

$$\mu^{m+1} = \frac{\partial P_{m+1}}{\partial \theta^{m+1}} \quad (3.16)$$

3.5 Perumusan Minimalisasi

Perumusan masalah dalam kondisi kritis untuk analisis kestabilan transien dalam sistem *multi machine* didefinisikan pada persamaan (3.17)

$$\min_{x^0, x^1, \dots, x^{m+1}, \varepsilon, \tau, k, s, v} \left\{ \sum_{k=0}^m (\mu^k)' (\mu^k) + (\mu^{m+1})' W (\mu^{m+1}) \right\} \quad (3.17)$$

Dengan kondisi $x^k \in R^N, \varepsilon \in R, \tau \in R$

$$\mu^k = x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \cdot \varepsilon$$

$$\dot{x}^k = f(x^k)$$

Dengan kondisi batas

$$x^0 = X_F(\tau; x_{pre})$$

$$\mu^{m+1} = \left[\frac{\partial P^{m+1}}{\partial \theta^{m+1}} \cdot \dot{\theta} \right]$$

Nilai W adalah matriks absolut yang berbentuk persegi, dan bagian diagonalnya bernilai positif. Matriks tersebut digunakan untuk menjelaskan kondisi generator kritis pada UEP. Generator kritis memiliki nilai yang paling besar dibandingkan dengan generator yang lain. Karena pemilihan W tidak berpengaruh pada konvergensi ataupun akurasi pada semua simulasi, maka digunakanlah matriks identitas.

3.6 Matrik *Jacobian*

Matrik *jacobian* digunakan untuk memodelkan Xd' (dinotasikan dengan A) pada sistem. Secara umum, jumlah variabelnya adalah $Node \times NG \times (m + 2) + 2$ dan $Node \times NG \times (m + 2)$. $Node$ adalah hasil persamaan differensial, dan NG adalah nomor generator. Kedua persamaan dan variabelnya akan berubah sesuai dengan kondisi *end point*, x'' sesuai dengan Gambar 3.2.

$$\begin{array}{c}
\text{Node} \times \text{NG} \times (\text{m}+2) + 2 \\
\begin{array}{cccc}
\text{NG} \times (\text{m}+2) & \text{NG} \times (\text{m}+2) & 1 & 1 \\
\overbrace{\tilde{\omega}_1^0 \dots \tilde{\omega}_{\text{NG}}^{\text{m}+1}} & \overbrace{\theta_1^0 \dots \theta_{\text{NG}}^{\text{m}+1}} & \underbrace{\varepsilon} & \underbrace{\tau}
\end{array} \\
\begin{array}{l}
\text{NG} \times (\text{m}+1) \left\{ \begin{array}{l} \tilde{\omega}_1^0 \dots \tilde{\omega}_{\text{NG}}^{\text{m}} \end{array} \right\} \\
\text{NG} \times (\text{m}+1) \left\{ \begin{array}{l} \theta_1^0 \dots \theta_{\text{NG}}^{\text{m}} \end{array} \right\} \\
\text{Node} \times \text{NG} \left\{ \begin{array}{l} f_\theta \ f_{\tilde{\omega}_1} \dots f_{\tilde{\omega}_N} \end{array} \right\}
\end{array}
\end{array}
\left[\begin{array}{cccc}
A\tilde{\omega}\tilde{\omega} & A\tilde{\omega}\theta & A\tilde{\omega}\varepsilon & A\tilde{\omega}\tau \\
A\theta\tilde{\omega} & A\theta\theta & A\theta\varepsilon & A\theta\tau \\
A f_\theta & A f_\theta & A f_\varepsilon & A f_\tau
\end{array} \right]$$

Gambar 3.2 Dimensi dan Konfigurasi Matrik *Jacobian*

3.7 Metode Newton Raphson

Pada kondisi awal, X_s adalah penyelesaian $G(X)$, dengan catatan X_s diberi batas error ΔX , dan nilai awal X_0 .

$$X_s = X_0 + \Delta X \quad (3.18)$$

Selanjutnya mensubstitusikan ke dalam $G(X)$ dan deret Taylor, didapat:

$$G(X_0 + \Delta X) \cong G(X_0) + \left[\frac{\partial G(X_0)}{\partial X} \right] \Delta X \quad (3.19)$$

Batas error perlu diatur terlebih dahulu untuk mendefinisikan nilai yang konvergen. Ketika batas *error* mendekati nol dan $G(X_s) = 0$, maka dapat dituliskan:

$$G(X_0) + J\Delta X \cong 0 \quad (3.20)$$

Dengan

$$J \equiv \frac{\partial G(X)}{\partial X} \quad (3.21)$$

$$b \equiv G(X_0) \quad (3.22)$$

$$\varepsilon \equiv J\Delta X + b \quad (3.23)$$

J adalah matrik *Jacobian*, b adalah nilai error, dan ε adalah batas error. Selanjutnya *error* dapat disederhanakan menjadi:

$$f = \varepsilon^T \varepsilon \quad (3.24)$$

Substitusikan (3.23) dan (3.24), didapatkan:

$$f = (J\Delta X + b)^T (J\Delta X + b) \quad (3.25)$$

$$f' = J^T (J\Delta X + b)^T (J\Delta X + b) J = 0 \quad (3.26)$$

$$\Delta X = -(J^T J)^{-1} J^T b \quad (3.27)$$

Substitusikan persamaan (3.26) dengan persamaan (3.27), sehingga didapatkan:

$$\Delta X = -(J^T J)^{-1} J^T G(X_0) \quad (3.28)$$

Kemudian nilai ΔX akan *diupdate* dengan memberi nilai awal baru. Konvergensi dari nilai ΔX metode Newton-Raphson ini dapat dicapai ketika nilai $|dx_i|$ sangat kecil, atau mendekati nol.

$$X_{NEW} = X_{OLD} + \Delta X \quad (3.29)$$

3.8 Persamaan Ayunan

Pada kondisi normal, posisi antara axis rotor dan resultan medan magnetik adalah tetap. Sudut antar keduanya dinyatakan sebagai sudut daya atau sudut torsi. Persamaan tersebut menjelaskan gerak realtif, yang dikenal dengan persamaan ayunan atau *swing equation* [8].

Generator sinkron membangkitkan torsi elektris (T_e) dan beroperasi pada kecepatan sinkron (ω_{sm}). Torsi mekanis (T_m) mempengaruhi torsi mekanis dari mesin. Pada kondisi operasi steady state nilai T_m sama dengan T_e . Apabila terjadi gangguan setelah kondisi steady state, maka muncul percepatan ($T_m > T_e$) atau perlambatan ($T_m < T_e$) pada torsi mesin T_a .

$$T_a = T_m - T_e \quad (3.30)$$

Kemudian jika terdapat akselerasi (J) adalah kombinasi antara momen inersia dari prime mover dan generator, dengan mengabaikan friksi dan torsi damping, maka dapat dituliskan

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (3.31)$$

θ_m adalah perpindahan angular dari rotor terhadap axis stasioner dari stator. Karena yang diperhatikan kecepatan relatif rotor pada kecepatan kecepatan sinkron, maka dibutuhkan referensi angular pada referensi gerak berputar sinkron (ω_m)

$$\theta_m = \omega_{sm} t + \delta_m$$

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt}$$

$$\frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} \quad (3.32)$$

Dari persamaan (3.31) dan (3.32) maka dapat dituliskan sebagai:

$$J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (3.33)$$

T_a merupakan percepatan torsi. Apabila di kedua sisi dikalikan dengan ω_m maka persamaannya:

$$J \omega_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \omega_m (T_m - T_e)$$

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (3.34)$$

Selanjutnya nilai $J \omega_m$ dapat ditulis dengan M yang merupakan konstanta inersia. Apabila dihubungkan dengan energi kinetik yang dari massa yang bergerak, maka dapat dijabarkan

$$W_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2 = \frac{1}{2} M \omega_m^2$$

$$M = \frac{2W_k}{\omega_m} = \frac{2W_k}{\omega_{sm}} \quad (3.35)$$

Walaupun M dikatakan sebagai konstanta inersia, pada aplikasinya nilainya tidak selalu konstan pada saat kecepatan rotor berubah dari kecepatan sinkronnya. Namun, karena sebelum hilang sinkronisasi ω_m tidak banyak berubah, maka M digunakan pada kecepatan sinkron dan nilainya konstan.

Kemudian lebih tepat apabila persamaan ayunan sebagai electrical power angle (δ). Jika p adalah jumlah kutub dari generator sinkron, maka electrical power angle-nya akan berhubungan dengan mechanical power angle (δ_m).

$$\delta = \frac{p}{2} \delta_m \quad (3.36)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (3.36) dan (3.34), maka didapatkan persamaan ayunan dari electrical power angle:

$$\left(\frac{2M}{P}\right) \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \left(\frac{2M}{P}\right) \ddot{\delta} = \left(\frac{2M}{P}\right) \dot{\omega} = P_a \quad (3.37)$$

Persamaan (3.37) merepresentasikan hubungan daya percepatan terhadap electrical angle δ dan kecepatan sudutnya pada medan magnet yang berputar dengan kecepatan ω . Pada banyak kasus, maka akan muncul banyak perhitungan seperti pada persamaan (3.37). Pada kasus sistem besar, maka lebih mudah bila diubah menjadi satuan per unit (p.u.). Karena analisis sistem tenaga dikerjakan dalam satuan p.u., maka diperlukan base power (S_B), sehingga dijelaskan dengan :

$$P_{au} = \frac{P_a}{S_B} = \left(\frac{2M}{PS_B}\right) \ddot{\delta} = \left(\frac{2M}{PS_B}\right) \dot{\omega} \quad (3.38)$$

P_a adalah dalam bentuk p.u. sedangkan M , p , δ , dan ω sebelumnya dalam unit yang sama.

$$T_a = \left(\frac{2J}{P}\right) \ddot{\delta} = \left(\frac{2J}{P}\right) \dot{\omega} \quad (3.39)$$

Kemudian dirubah dengan membagi nilai basenya dengan n_s adalah rating kecepatan shaft.

$$T_B = \frac{S_B}{\omega_{ms}} = \frac{60S_B}{2\pi n_s} \quad (3.40)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (3.39) dan (3.40), dan menghitung p dengan $120f_s/n_s$ maka bisa didapatkan :

$$\frac{J\pi^2 n_s^2}{900\omega_s S_{B3}} \dot{\omega} = \frac{T_a}{T_B} = T_{au} \quad (3.41)$$

Persamaan (3.41) telah disubstitusikan $w_s=2\pi f_s$, untuk base frekuensinya. T_a adalah rad. Pada prakteknya, J disebut WR^2/g , g adalah percepatan gravitasi ($32,17398 \text{ ft/s}^2$). Perhitungan dalam MKS (J.s^2 atau kg.m^2) dapat dihitung :

$$J = \frac{(WR^2)\text{slugft}^2}{g} = \frac{(WR^2)746}{550g} \quad (3.42)$$

Masukkan (3.42) ke persamaan (3.41), menjadi :

$$T_{au} = \frac{(WR^2)746\pi^2 n_s^2}{550g (900)\omega_s S_{B3}} \cdot \dot{\omega} \quad (3.43)$$

$\dot{\omega}$ dapat dijabarkan dengan rumus energi kinetik :

$$\begin{aligned} W_k &= \frac{1}{2} J \omega_m^2 \\ W_k &= \frac{1}{2} \frac{746WR^2}{500g} \frac{(2\pi n_s)^2}{3600} \\ W_k &= 2,311525 \times 10^{-4} (WR^2) n_s^2 \end{aligned} \quad (3.44)$$

Persamaan ayunannya dapat dituliskan :

$$\frac{2W_k}{\omega_s S_{B3}} \dot{\omega} = T_{au} \quad (3.45)$$

$$\left(\frac{2H}{\omega_s} \right) \dot{\omega} = T_{au} \quad (3.46)$$

S_B adalah MVA base 3 fasa, dan W_k adalah persamaan (3.44), dan H adalah konstanta inersia. ω adalah electrical radian per detik, karena kecepatan sudutnya bergerak mengikuti medan magnetik yang ada di sistem. Selain itu juga digunakan pada mesin dengan banyak kutub, karena mesin berputar dengan kecepatan ω_s . Penggunaan H juga mempermudah pengamatan terkait ukuran MVA mesin karena satuannya dalam p.u. Kemudian, karena koefisien inersia diasumsikan sebagai M dalam s, persamaan ayunan dapat dituliskan sebagai berikut

$$\frac{M}{\omega_s} \ddot{\delta} = \frac{M}{\omega_s} \dot{\omega} = P_m - P_e \quad (3.47)$$

Atau ditulis dalam H dalam p.u.

$$\frac{2H}{\omega_s} \ddot{\delta} = M \dot{\omega} = P_m - P_e \quad (3.48)$$

Apabila mempertimbangkan torsi damping D , maka tidak dihitung pada persamaan T_e , namun persamaannya didapatkan dengan memperhitungkan selisih kecepatannya. Jika dibawa ke persamaan (3.47)

$$\frac{M}{\omega_s} \ddot{\delta} = \frac{M}{\omega_s} \dot{\omega} = P_m - P_e - \frac{D}{\omega_s} \omega \quad (3.49)$$

Sedangkan jika dibawa ke persamaan (3.48)

$$\frac{2H}{\omega_s} \ddot{\delta} = M \dot{\omega} = P_m - P_e - \frac{D}{\omega_s} \omega \quad (3.50)$$

H adalah konstanta inersia dalam p.u. Sebagai catatan adalah ω adalah kecepatan sudut pada medan magnetik sehingga berhubungan tegangan dan arus. Pada kasus ini, ω adalah electrical radian per detik. Persamaan ayunan dapat digunakan untuk mesin mesin dengan berbagai macam kutub, karena semua mesin dibawa pada satuan per unit.

3.8.1 Multimesin Terhubung pada Bus Infinit

Model sistem multimesin terhubung pada bus infinit diartikan sebagai model xd' generator yang ditunjukkan oleh dua persamaan diferensial. Persamaan ayunan direpresentasikan oleh persamaan berikut:

$$\begin{aligned} M_i \dot{\omega}_i &= P_{mi} - P_{ei}(\delta) - D_i \omega_i \\ \dot{\delta}_i &= \omega_i \end{aligned} \quad (3.51)$$

Dimana,

$$P_{ei}(\delta) = \sum_{j=i}^n Y_{ij} E_i E_j \cos(-\delta_i + \delta_j + \alpha_{ij}) \quad (3.52)$$

3.8.2 Multimesin Tanpa Terhubung Infinite Bus

Model sistem multimesin, menggunakan *Center of Angle* (COA) atau *Center of Inertia* (COI), diartikan sebagai model xd' generator yang ditunjukkan oleh dua persamaan diferensial. Metode ini mengenalkan konsep titik berat untuk pendefinisian *center of angle* atau *center of inertia*. Sudut ini dinotasikan dengan δ_0 dan menunjukkan nilai rata rata berat inersia dari semua sudut rotor. Dalam pendefinisiannya, rumus COA dituliskan sebagai berikut :

$$M_T \delta_0 = \sum_{i=1}^n M_i \delta_i \quad (3.53)$$

Dengan

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_i$$

Sehingga bisa didapat nilai derivatif dari (3.53) sebagai berikut :

$$M_T \dot{\delta}_0 = \sum_{i=1}^n M_i \dot{\delta}_i \quad (3.54)$$

Dalam sudut pandang definisi (3.53) mengenai COI, kita juga bisa mendapatkan derivatif

$$\sum_{i=1}^n M_i \theta_i = 0; \sum_{i=1}^n M_i \dot{\theta}_i = 0; \sum_{i=1}^n M_i \ddot{\theta}_i = 0$$

$$\sum_{i=1}^n M_i \widetilde{\omega}_i = 0; \sum_{i=1}^n M_i \ddot{\omega}_i = 0$$

Sehingga bisa didapatkan definisi seperti berikut $\dot{\delta}_i = \omega_i$ dan $\ddot{\delta}_i = \dot{\omega}_i$. Dari kedua definisi tersebut selanjutnya disubstitusikan ke (3.51) sehingga :

$$\begin{aligned}
M_T \dot{\omega}_0 &= \sum_{i=1}^n M_i \dot{\omega}_i \\
M_T \dot{\omega}_0 &= \sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{ei}(\delta)) \\
M_T \dot{\omega}_0 &= \sum_{i=1}^n (P_{mi} - E_i^2 G_{ii}) - 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n E_i E_j G_{ij} \cos \delta_{ij} \\
M_T \dot{\omega}_0 &= P_{COI} \\
\dot{\omega}_0 &= \frac{1}{M_T} P_{COI}
\end{aligned} \tag{3.55}$$

$$\dot{\delta}_0 = \omega_0 \tag{3.56}$$

Kemudian bisa dituliskan :

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{ei}(\delta)) &= \sum_{i=1}^n (P_{mi} - E_i^2 G_{ii}) - [(2E_1 E_2 G_{12} \cos \delta_{12} + \\
& 2E_1 E_3 G_{13} \cos \delta_{13} + \dots + 2E_1 E_n G_{1n} \cos \delta_{1n}) + \\
& (2E_2 E_3 G_{23} \cos \delta_{23} + 2E_2 E_4 G_{24} \cos \delta_{24} + \dots + \\
& 2E_2 E_n G_{2n} \cos \delta_{2n}) + \dots + 2E_{n-1} E_n G_{n-1n} \cos \delta_{n-1n}]
\end{aligned} \tag{3.57}$$

$$M_T \dot{\omega}_0 = \sum_{i=1}^n (P_{mi} - E_i^2 G_{ii}) - 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n E_i E_j G_{ij} \cos \delta_{ij} \tag{3.58}$$

Akhirnya, keadaan dinamis dari referensi COI dapat diatur dengan (3.55) dan (3.56) untuk mendefinisikan sudut terbaru dan kecepatan relatif pada referensi

$$\theta_i = \delta_i - \delta_0 \text{ dan } \tilde{\omega}_i = \omega_i - \omega_0 \tag{3.59}$$

Dari persamaan gerak dari COI atau COA dapat dijelaskan pada persamaan (3.51) sebagai berikut

$$\begin{aligned}
M_i (\ddot{\tilde{\omega}}_i + \dot{\omega}_0) &= P_{mi} - P_{ei}(\theta) - D_i(\tilde{\omega}_i) \\
M_i \ddot{\tilde{\omega}}_i &= P_{mi} - P_{ei}(\theta) - M_i \dot{\omega}_i - D_i(\tilde{\omega}_i) \\
M_i \ddot{\tilde{\omega}}_i &= P_{mi} - P_{ei}(\theta) - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} - D_i(\tilde{\omega}_i)
\end{aligned}$$

$$M_i \ddot{\tilde{\omega}}_i = P_{mi} - P_{ei}(\theta) - \frac{M_i}{M_T} P_{COA} - D_i(\tilde{\omega}_i) \quad (3.60)$$

$$\dot{\theta}_i = \tilde{\omega}_i \quad (3.61)$$

dengan,

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_i; \omega_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i; \delta_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \delta_i; \quad (3.62)$$

$$\theta_i = \delta_i - \delta_0; \tilde{\omega}_i = \omega_i - \omega_0; P_{COA} = \sum_{i=1}^n P_{mi} - P_{ei}(\theta) \quad (3.63)$$

$$P_{ei}(\theta) = \sum_{j=i}^n Y_{ij} E_i E_j \sin(\theta_i - \theta_j + \alpha_{ij}) \quad (3.64)$$

P_{mi} adalah representasi daya mekanik generator ke- i , P_{ei} adalah daya elektrik generator ke- i , D_i adalah damping generator ke- i , ω_i adalah kecepatan rotor generator ke- i , δ_i dan θ_i adalah penyimpangan sudut generator ke- i , M_i adalah momen inersia generator ke- i , E_i adalah tegangan akhir reaktansi transien generator ke- i , V_{refi} adalah tegangan terminal referensi ke- i , V_{ti} adalah tegangan terminal ke- i , sedangkan P_{mrefi} adalah daya mekanik referensi ke- i .

3.9. Studi Aliran Daya

Studi aliran daya bermanfaat untuk perencanaan dan pengoperasian dalam sistem tenaga. Melalui analisis aliran daya, dapat dihitung tegangan dan sudut dari pada setiap bus. Perhitungan daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) pada bus dapat dituliskan:

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i = \sum_i^n \sum_j^n V_i^* V_j Y_{ij} \quad (3.65)$$

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* = \sum_i^n \sum_j^n V_i^* V_j Y_{ij} \quad (3.66)$$

Persamaan (3.65) menjelaskan untuk kondisi *I leading* terhadap V (beban bersifat kapasitif), sedangkan (3.66) untuk kondisi *I lagging* terhadap V

(beban bersifat induktif). Pada kondisi sistem yang memiliki sifat *leading* dan *lagging*, dapat dituliskan :

$$P_i - jQ_i = V_i * I_i = \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j Y_{ij}| \angle (-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \quad (3.67)$$

Persamaan aliran daya dapat dituliskan kedalam bentuk

a. Bentuk *polar* :

Daya aktif:

$$\begin{aligned} P_i &= \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \\ P_i &= |V_i|^2 G_{ii} + \sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \end{aligned} \quad (3.68)$$

Daya reaktif:

$$\begin{aligned} Q_i &= -\sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \\ Q_i &= -|V_i|^2 B_{ii} - \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \end{aligned} \quad (3.69)$$

b. Bentuk *rectangular*:

Daya aktif:

$$P_i = \text{real} \left\{ V_i * \sum_i^n \sum_j^n V_j Y_{ij} \right\} \quad (3.70)$$

Daya reaktif:

$$Q_i = -\text{imaginer} \left\{ V_i * \sum_i^n \sum_j^n V_j Y_{ij} \right\} \quad (3.71)$$

c. Bentuk *hybrid*:

Daya aktif:

$$\begin{aligned} P_i &= \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos[-(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})] \\ P_i &= \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos[(\delta_i - \delta_j) - (\theta_{ij})] \\ P_i &= \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j| [\cos(\delta_i - \delta_j) |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij}) + \sin(\delta_i - \delta_j) |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij})] \\ P_i &= \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j| [\cos(\delta_i - \delta_j) G_{ij} + \sin(\delta_i - \delta_j) B_{ij}] \end{aligned} \quad (3.72)$$

Daya reaktif:

$$\begin{aligned}
Q_i &= -\sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin[-(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})] \\
Q_i &= \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin[(\delta_i - \delta_j) - (\theta_{ij})] \\
Q_i &= \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j Y_{ij}| [\sin(\delta_i - \delta_j) \cos(\theta_{ij}) + \cos(\delta_i - \delta_j) \sin(\theta_{ij})] \\
Q_i &= \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j| [\sin(\delta_i - \delta_j) \cos(\delta_i - \delta_j) G_{ij} + \cos(\delta_i - \delta_j) B_{ij}]
\end{aligned}
\tag{3.73}$$

3.9.1 Matrik Jacobian Untuk Aliran Daya

Langkah selanjutnya pada proses aliran daya adalah akan dibentuk matrik Jacobian. Umumnya matrik jacobian dalam aliran daya ditulis dengan persamaan:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial V_n} \\ \vdots & J_{11} & \vdots & \vdots & J_{12} & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial V_n} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_n} \\ \vdots & J_{21} & \vdots & \vdots & J_{22} & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_i}{\partial V_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \frac{\Delta V_1}{|V_1|} \\ \vdots \\ \frac{\Delta V_n}{|V_n|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix}
\tag{3.74}$$

Persamaan matrik Jacobian (3.74) dapat disederhanakan sesuai dengan persamaan:

$$\begin{bmatrix} H_{ij} & N_{ij} \\ J_{ij} & L_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix}
\tag{3.75}$$

dimana

$$H_{ij} = \sum_i^n \sum_j^n \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} \Delta \delta_i
\tag{3.76}$$

$$N_{ij} = \sum_i^n \sum_j^n |V_i| \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} \quad (3.77)$$

$$J_{ij} = \sum_i^n \sum_j^n \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} \Delta \delta_i \quad (3.78)$$

$$L_{ij} = \sum_i^n \sum_j^n |V_i| \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} \quad (3.79)$$

H_{ij} adalah perubahan daya aktif terhadap sudut δ , N_{ij} adalah perubahan daya aktif terhadap tegangan, J_{ij} Perubahan daya reaktif terhadap sudut, L_{ij} adalah perubahan daya reaktif terhadap tegangan.

3.9.2 Perhitungan Aliran Daya Menggunakan Newton Raphson

Untuk mendapatkan nilai terbaru sudut $\Delta \delta_i$ dan tegangan ΔV_i pada aliran daya maka digunakan metode Newton Raphson. Untuk mendapatkan kedua nilai tersebut digunakan persamaan:

$$\delta^{k+1} = \delta^k + \Delta \delta^k \quad (3.79)$$

$$|V|^{k+1} = |V|^k \left[1 + \frac{\Delta |V|^k}{|V|^k} \right] \quad (3.80)$$

Iterasi dilakukan hingga mendapat nilai yang konvergen, dengan ΔP dan ΔQ bernilai nol atau bernilai sangat kecil sehingga bisa didapatkan hasil yang tepat.

3.10 Reduksi Matrik

Dalam perhitungan matriks ini digunakan reduksi Kron untuk mereduksi matrik admitansi, mempercepat proses perhitungan. Secara umum matrik admitansi ditulis sesuai dengan persamaan:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \\ I_{n+1} \\ \vdots \\ I_{n+m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} & Y_{1(n+1)} & Y_{1(n+2)} & \cdots & Y_{1(n+m)} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} & Y_{2(n+1)} & Y_{2(n+2)} & \cdots & Y_{2(n+m)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} & Y_{n(n+1)} & Y_{n(n+2)} & \cdots & Y_{n(n+m)} \\ Y_{(n+1)1} & \cdots & \cdots & Y_{(n+1)n} & Y_{(n+1)(n+1)} & \cdots & \cdots & Y_{(n+1)(n+m)} \\ \vdots & & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ Y_{(n+m)1} & \cdots & \cdots & Y_{(n+m)n} & Y_{(n+m)(n+1)} & \cdots & \cdots & Y_{(n+m)(n+m)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \\ E_{n+1} \\ \vdots \\ E_{n+m} \end{bmatrix} \quad (3.81)$$

Dapat dituliskan menjadi :

$$\begin{bmatrix} I_n \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_n & Y_{nm} \\ Y_{nm}^t & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ E_m \end{bmatrix} \quad (3.82)$$

Notasi n adalah bus beban dan m adalah bus generator. Karena tidak ada arus yang mengalir menuju bus beban, maka I_n bernilai nol. Persamaan matrik menjadi:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_n & Y_{nm} \\ Y_{nm}^t & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ E_m \end{bmatrix} \quad (3.83)$$

Sehingga dapat dituliskan

$$Y_n V_n + Y_{nm} E_m = 0 \quad (3.84)$$

$$V_n = - \left(\frac{Y_{nm} E_m}{Y_n} \right) = -(Y_n^{-1} Y_{nm} E_m) \quad (3.85)$$

$$Y_{nm}^t V_n + Y_{mm} E_m = I_m \quad (3.86)$$

Dengan menstutitusikan persamaan V_n pada persamaan (3.85) kedalam persamaan (3.86) maka akan didapatkan persamaan:

$$I_m = Y_{nm}^t (-Y_n^{-1} Y_{nm} E_m) + Y_{mm} E_m \quad (3.87)$$

$$I_m = -(Y_{nm}^t Y_n^{-1} Y_{nm} E_m) + Y_{mm} E_m \quad (3.88)$$

Dapat ditulis lebih sederhana menjadi:

$$I_m = Y_{reduksi} \cdot E_m \quad (3.89)$$

dengan,

$$Y_{reduksi} = Y_{mm} - Y_{nm}^t Y_n^{-1} Y_{nm} \quad (3.90)$$

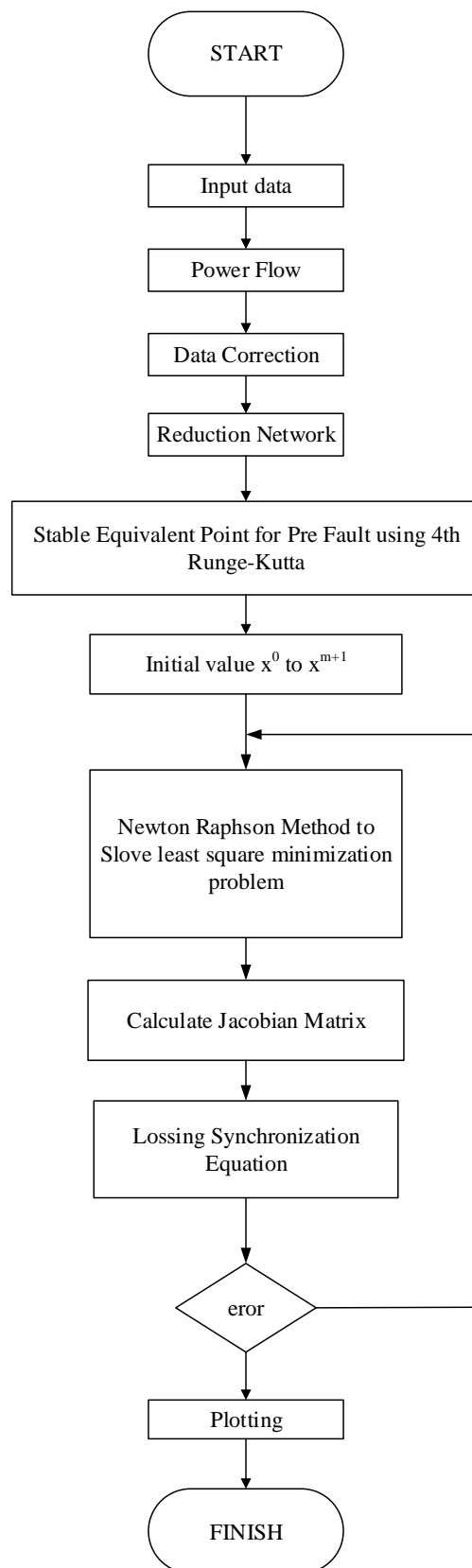
3.11 *Smart Grid*

Smart Grid merupakan jaringan *self-healing* yang dilengkapi dengan teknik dinamik optimasi dan pengukuran *real time* untuk menjaga kualitas daya dengan mengurangi *losses*, menjaga level tegangan, meningkatkan aset manajemen dan meningkatkan kehandalan sistem [6]. Sistem ini dapat membantu keperluan penggunaannya, dengan cara pengaturan *distributed generation* (DG), manajemen ketersediaan, serta sistem *energy storage*.

Distributed Generation (DG) memiliki keunggulan diantaranya yaitu dapat mensuplai beban dasar, beban puncak, dapat juga sebagai pembangkit cadangan, menaikkan tegangan stabilitas jaringan. DG pada sistem tersebut menggunakan sumber energi terbarukan (*renewable energy*) yaitu *Micro Hydro* sebagai sumber pembangkit listrik. Daya yang mampu dibangkitkan oleh sebuah DG adalah 30-300kW.

3.12 **Diagram Alir**

Gambar 3.12 menunjukkan diagram alir untuk menghitung CCT dengan menggunakan persamaan hilangnya sinkronisasi.



Gambar 3.12. Diagram Alir untuk Menghitung CCT.

Halaman ini sengaja dikosongkan

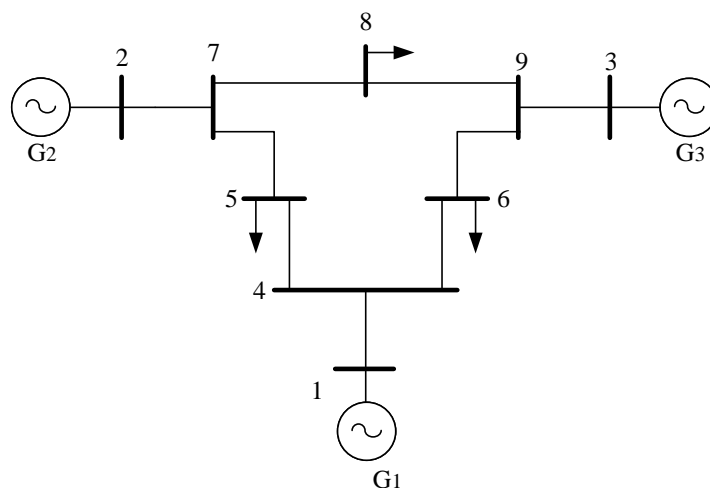
BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS

Simulasi dilakukan untuk menguji keakuratan metode dan pemodelan yang telah dirancang. Simulasi dilakukan pada beberapa sistem yang mencerminkan sistem multimesin sehingga didapatkan hasil yang akurat. Sistem yang digunakan dalam simulasi ini adalah sistem Fouad dan Anderson 3-generator 9-bus, sistem IEEE 3-generator 16-bus, sistem IEEE 3-generator 33-bus, sistem IEEE 6-generator 30-bus. Dalam penelitian ini diasumsikan saluran transmisi adalah *single circuit* dan gangguan yang terjadi adalah gangguan hubung singkat 3 fasa ke tanah. Gangguan yang terjadi diasumsikan pada titik yang sangat dekat dengan bus. Selanjutnya gangguan akan dihilangkan dengan membuka saluran yang terjadi gangguan.

4.1 Perhitungan CCT pada Sistem Fouad dan Anderson 3-Generator 9-Bus

Untuk menguji keakuratan metode, dilakukan simulasi pada sistem Fouad dan Anderson 3-generator 9-bus. Sistem multimesin ini terdiri dari 9 bus (1 *slack bus*, 2 *generator bus* dan 3 *load bus*), 9 saluran, serta 3 generator. Gambar 4.1 menunjukkan *single line diagram* sistem Fouad dan Anderson 3-generator 9-bus.



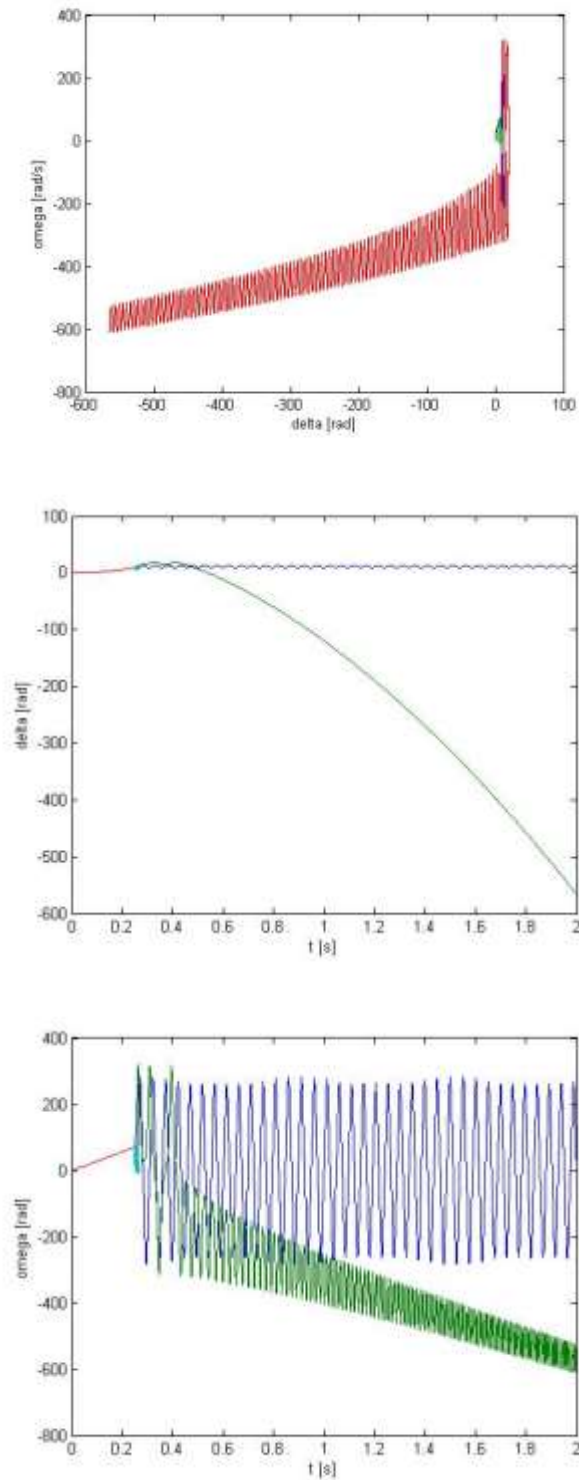
Gambar 4.1. Sistem Fouad dan Anderson 3-Generator 9-Bus

Simulasi pada penelitian ini dilakukan menggunakan model generator. Kemudian model generator tersebut diuji pada dua model sistem yaitu berdasarkan referensi *COA/COI* dan Bus Infinit. Selain itu, pada masing-masing model sistem akan dilakukan pengujian dengan adanya penambahan *damping* sebesar 1%. Dengan demikian hasil dari simulasi mampu memberikan gambaran kestabilan sistem pada berbagai model.

4.1.1 Perhitungan CCT pada Sistem Fouad dan Anderson 3-Generator 9-Bus Menggunakan Referensi *COA/COI*

Simulasi perhitungan CCT pada sistem Fouad dan Anderson 3-generator 9-bus menggunakan referensi COA diuji pada 6 titik gangguan. CCT didapatkan dengan menguji sistem menggunakan *proposed method*. Nilai CCT yang didapatkan akan dibandingkan dengan metode konvensional *Simulation Method* untuk membuktikan keakuratan *proposed method*. Gambar 4.2 merupakan kondisi stabil dan tidak stabil sudut rotor (δ), kecepatan sudut (ω), pada gangguan di titik “F” menggunakan *Simulation Method* yang dibandingkan dengan nilai CCT menggunakan *proposed method* tanpa adanya penambahan *damping*.

Gambar 4.2 menunjukkan nilai CCT yang didapat menggunakan *proposed method* tidak mengalami perbedaan yang signifikan jika dibandingkan dengan metode konvensional *Simulation Method*. Kemudian Tabel 4.1 menunjukkan perbandingan nilai CCT pada setiap gangguan menggunakan *proposed method* dengan nilai CCT menggunakan *Simulation Method* tanpa adanya penambahan *damping*.



Gambar 4.2. Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan rad/s , Sudut Rotor (δ), Terhadap Waktu (t) Pada Gangguan di Titik “F” Sistem Fouad dan Anderson 3-Generator 9-Bus Tanpa Damping dengan Perhitungan COA

Tabel 4.1. Nilai CCT pada Sistem Fouad dan Anderson 3-Generator 9-Bus Tanpa *Damping* Menggunakan Referensi COA

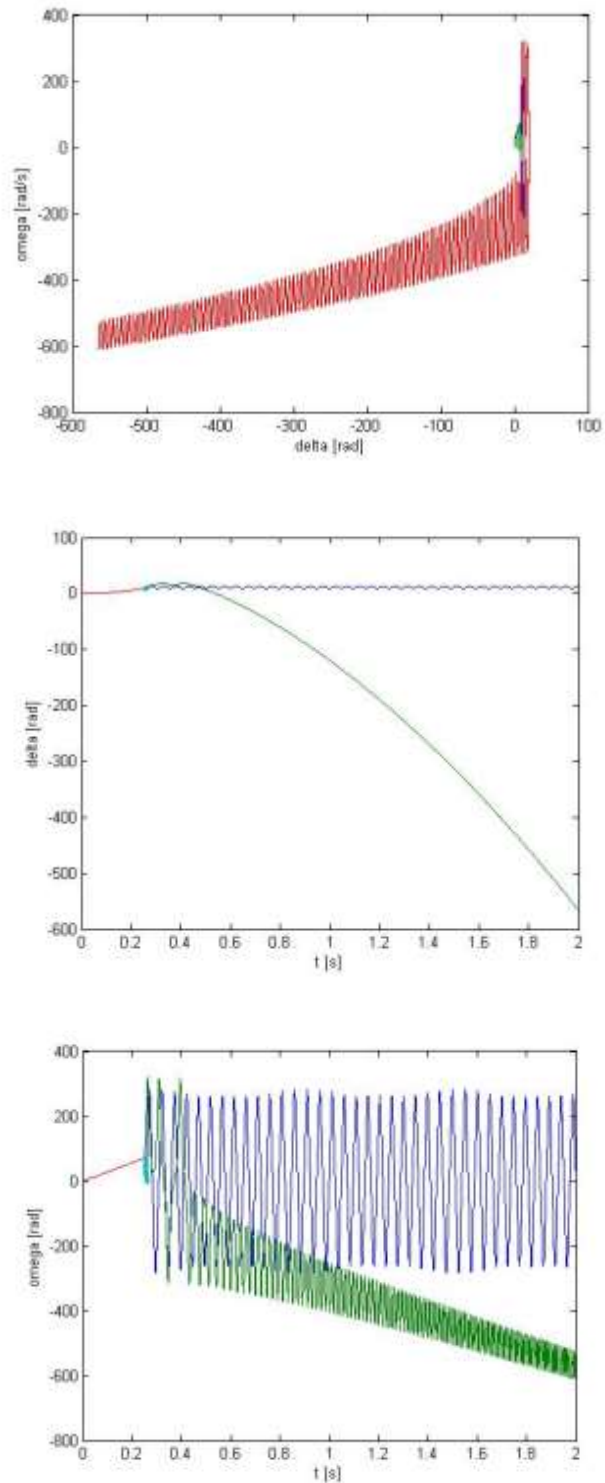
Fault	Open Line	Proposed Method			Simulation Method	
		CCT [s]	CPU [s]	CG	CCT [s]	CPU [s]
A	4-5	0,2101	0,4365	G2	0,24-0,25	1,386
B	4-6	0,2130	0,1884	G3	0,24-0,25	0,9201
C	7-5	0,3825	0,5644	G2	0,38-0,39	1,5287
D	7-8	0,5890	0,3195	G2	0,59-0,60	1,0268
E	9-6	0,2410	0,297	G3	0,24-0,25	1,008
F	9-8	0,2368	0,3025	G3	0,25-0,26	1,012

Berdasarkan tabel 4.1, tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada nilai CCT menggunakan *proposed method* apabila dibandingkan dengan nilai CCT menggunakan metode konvensional *Simulation Method*. Selain itu, waktu *running* CPU untuk *proposed method* diketahui lebih cepat dibandingkan dengan metode konvensional *Simulation Method*.

Tahap selanjutnya sistem diuji dengan adanya penambahan *damping* pada model generator. Gambar 4.3 merupakan kondisi stabil dan tidak stabil sudut rotor (δ), kecepatan sudut (ω), pada gangguan di titik “F” menggunakan *Simulation Method* dengan dibandingkan dengan nilai CCT menggunakan *proposed method* terhadap pengaruh penambahan *damping*.

Tabel 4.2. Nilai CCT pada Sistem Fouad dan Anderson 3-Generator 9-Bus dengan *Damping* Menggunakan Perhitungan COA

Fault	Open Line	Proposed Method			Simulation Method	
		CCT [s]	CPU [s]	CG	CCT [s]	CPU [s]
A	4-5	1,6720	0,29	G2	1,57-1,58	1,2853
B	4-6	1,0520	0,355	G3	1,1-1,11	1,315
C	7-5	1,0042	0,377	G2	1,0-1,01	1,305
D	7-8	0,6877	0,282	G2	0,74-0,75	0,2829
E	9-6	0,7280	0,351	G3	0,76-0,77	1,266
F	9-8	0,6550	0,345	G3	0,75-0,76	1,2958



Gambar 4.3. Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan rad/s , Sudut Rotor (δ), Terhadap Waktu (t) Pada Gangguan di Titik “F” Sistem Fouad dan Anderson 3-Generator 9-Bus Tanpa Damping dengan Perhitungan COA

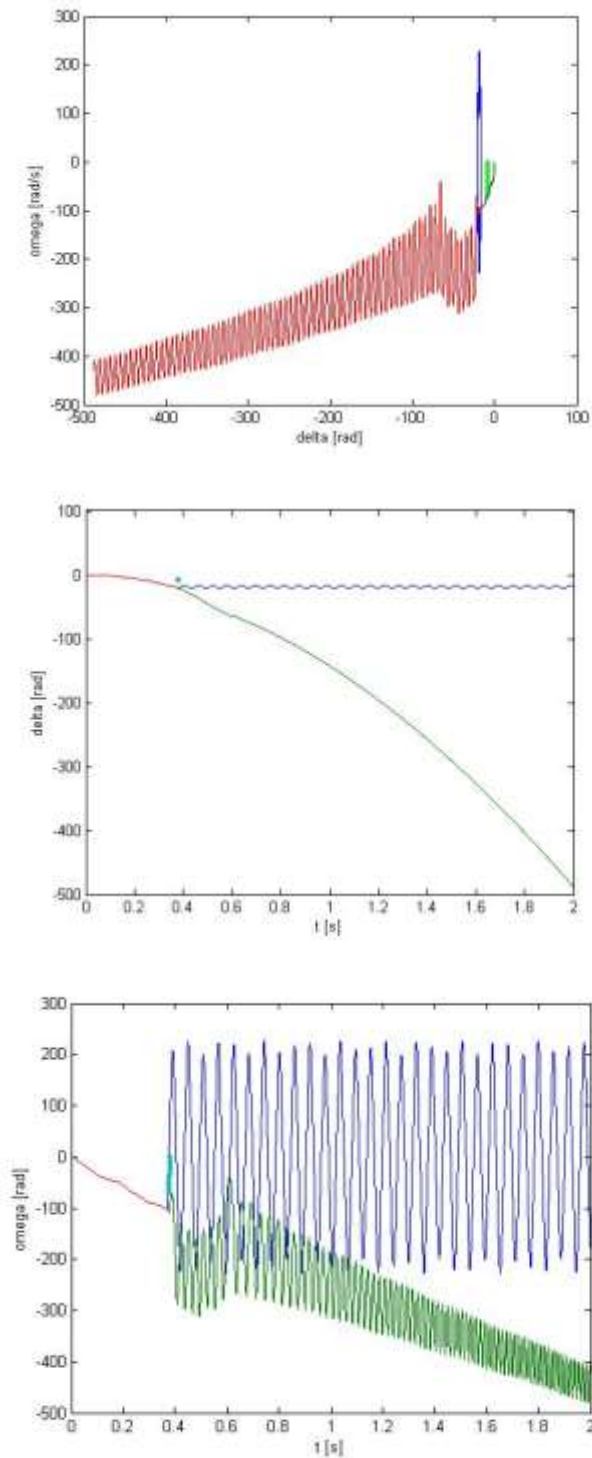
4.1.2 Perhitungan CCT pada Sistem Fouad dan Anderson 3-Generator 9-Bus dengan Terhubung pada Bus Infinit

Simulasi perhitungan CCT pada sistem Fouad dan Anderson 3-generator 9-bus terhubung pada bus infinit diuji pada 4 titik gangguan. Bus yang dijadikan Infinit adalah bus 1. CCT didapatkan dengan menguji sistem menggunakan metode yang diusulkan. Nilai CCT yang didapatkan akan dibandingkan dengan metode konvensional *Simulation Method* untuk membuktikan keakuratan metode yang diusulkan. Gambar 4.4 merupakan kondisi stabil dan tidak stabil sudut rotor (δ), kecepatan sudut (ω), pada gangguan di titik “B” menggunakan *Simulation Method* yang dibandingkan dengan nilai CCT menggunakan metode yang diusulkan tanpa adanya penambahan *damping*.

Pada gambar 4.4, tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara nilai CCT yang didapatkan dengan menggunakan metode yang diusulkan jika dibandingkan dengan metode konvensional *Simulation Method*. Pada Tabel 4.3, nilai CCT menggunakan metode yang diusulkan tidak berbeda jauh dengan nilai CCT menggunakan metode konvensional *Simulation Method*.

Tabel 4.3. Nilai CCT pada Sistem Fouad dan Anderson 3-Generator 9-Bus Tanpa *Damping* Menggunakan Perhitungan Modifikasi Infinite Bus

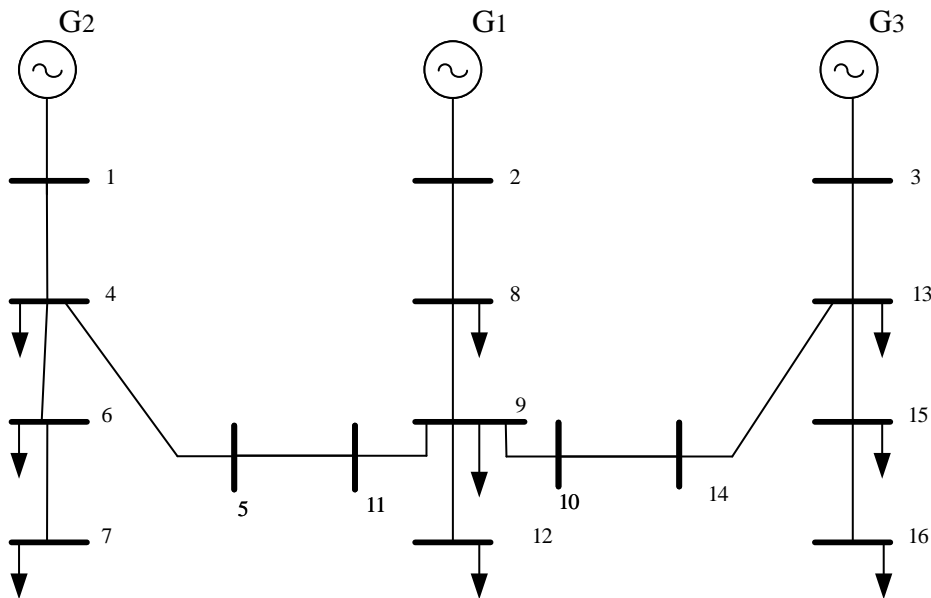
Fault	Open Line	Proposed Method			Simulation Method	
		CCT [s]	CPU [s]	CG	CCT [s]	CPU [s]
A	4-5	0,6596	0,2041	G3	0,68-0,69	0,5677
B	4-6	0,2359	0,508	G3	0,37-0,38	2,0182
C	7-5	0,9027	0,6436	G2	0,89-0,9	0,3145
D	7-8	0,8986	0,3159	G2	0,89-0,9	1,7458



Gambar 4.4. Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan rad/s , Sudut Rotor (δ), Terhadap Waktu (t) Pada Gangguan di Titik “B” Sistem Fouad dan Anderson 3-Generator 9-Bus Tanpa Damping dengan Perhitungan Modifikasi Infinite Bus

4.2 Perhitungan CCT pada Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus

Untuk menguji keakuratan metode, dilakukan simulasi pada sistem IEEE 3-generator 16-bus. Sistem multimesin ini terdiri dari 3 generator (1 *slack bus*, 2 *generator bus*) dan 16 *load bus* dan 15 saluran. Gambar 4.5 menunjukkan *single line diagram* modifikasi sistem IEEE 3-generator 16-bus.



Gambar 4.5. Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus Radial

Model generator tersebut diuji pada dua model sistem yaitu berdasarkan referensi *COA/COI* dan Bus Infinit. Selain itu, pada masing-masing model sistem akan dilakukan pengujian dengan adanya penambahan *damping* sebesar 1%. Dengan demikian hasil dari simulasi mampu memberikan gambaran kestabilan sistem pada berbagai model.

4.2.1 Perhitungan CCT pada Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus Menggunakan Referensi *COA/COI*

Simulasi perhitungan CCT pada modifikasi Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus menggunakan referensi COA diuji pada 10 titik gangguan.

CCT didapatkan dengan menguji sistem menggunakan *proposed method*. Nilai CCT yang didapatkan akan dibandingkan dengan metode konvensional

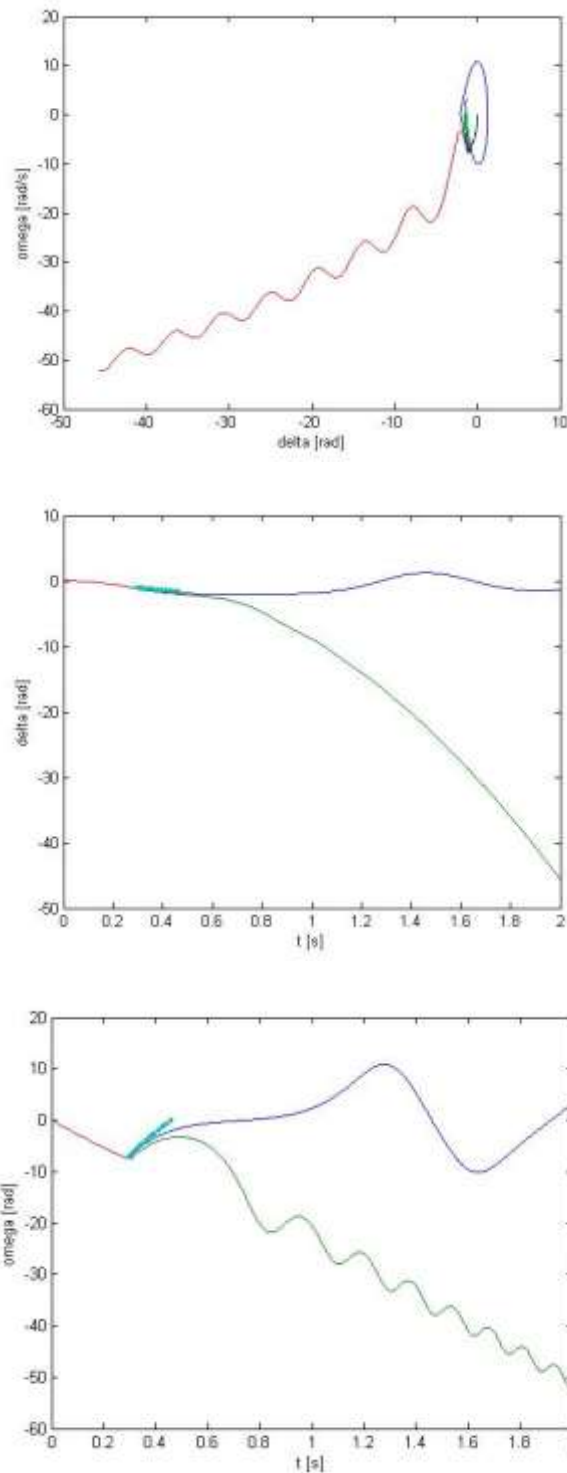
Simulation Method untuk membuktikan keakuratan *proposed method*. Gambar 4.12 merupakan kondisi stabil dan tidak stabil sudut rotor (δ), kecepatan sudut (ω), pada gangguan di titik “A” menggunakan *Simulation Method* yang dibandingkan dengan nilai CCT menggunakan *proposed method* tanpa adanya penambahan *damping*.

Berdasarkan gambar 4.6 juga dapat dilihat bahwa nilai CCT yang didapat menggunakan *proposed method* dengan metode konvensional. Berikut merupakan perbandingan nilai CCT pada setiap gangguan menggunakan *proposed method* dengan nilai CCT menggunakan *Simulation Method* tanpa adanya penambahan *damping*.

Tabel 4.5. Nilai CCT pada Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus Tanpa *Damping* Menggunakan Referensi COA

Fault	Open Line	Proposed Method			Simulation Method	
		CCT [s]	CPU [s]	CG	CCT [s]	CPU [s]
A	1-4	0,2641	0,5397	G3	0,29-0,3	2,5416
B	4-6	0,1481	0,2642	G2	0,14-0,15	3,1992
C	6-7	0,5511	0,2857	G2	0,55-0,56	3,3112
D	2-8	0,4733	0,5114	G2	0,47-0,48	4,6021
E	9-12	0,5792	0,2428	G2	0,55-0,56	3,5309
F	13-15	0,1747	0,5401	G3	0,17-0,18	3,4438
G	15-16	0,2740	0,4794	G3	0,27-0,28	3,3663

Berdasarkan tabel 4.5 dapat dilihat bahwa nilai CCT menggunakan *proposed method* tidak jauh berbeda dengan nilai CCT menggunakan metode konvensional *Simulation Method*. Selain itu, waktu *running* CPU diketahui lebih cepat dibandingkan dengan *Simulation Method*.



Gambar 4.6. Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan rad/s , Sudut Rotor (δ), Terhadap Waktu (t) Pada Gangguan di Titik “A” Sistem Fouad dan Anderson 3-Generator 16-Bus Tanpa Damping dengan Perhitungan COA

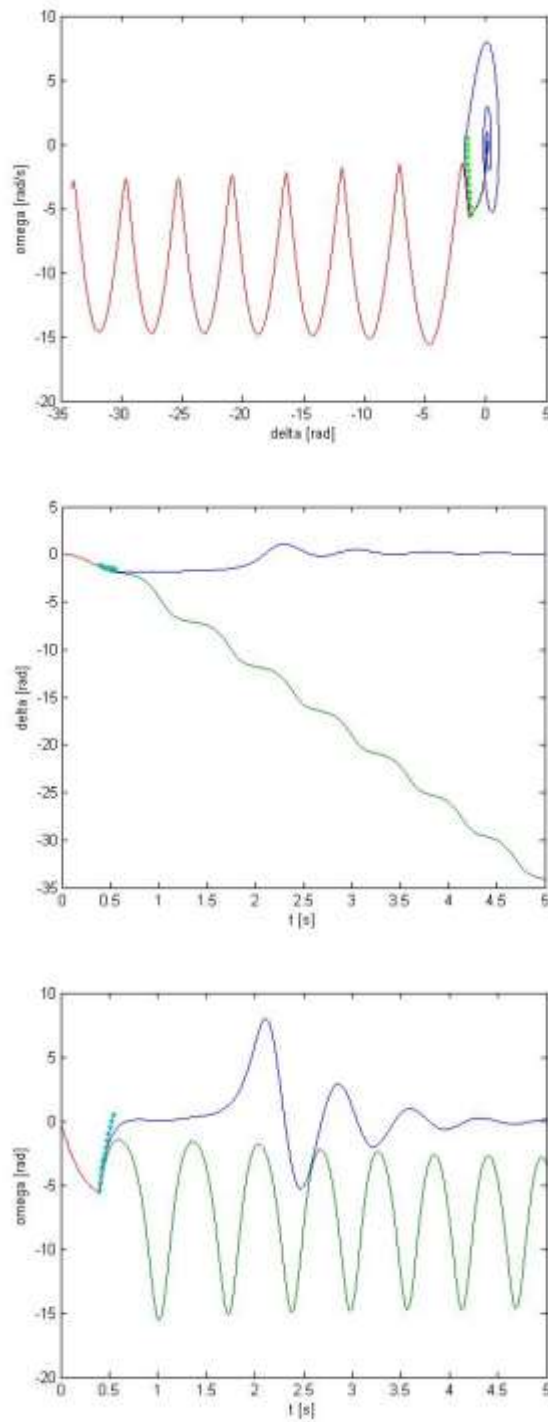
Selanjutnya, sistem diuji dengan adanya penambahan *damping* pada model generator. Nilai CCT yang didapatkan akan dibandingkan dengan metode konvensional *Simulation Method* untuk membuktikan keakuratan *proposed method*. Gambar 4.8 merupakan kondisi stabil dan tidak kecepatan sudut (ω) dalam satuan *rad/s*, sudut rotor (δ), terhadap waktu (t) pada gangguan di titik “H” menggunakan *Simulation Method* yang dibandingkan dengan nilai CCT menggunakan *proposed method* dengan adanya penambahan *damping*.

Gambar 4.7 menunjukkan nilai CCT yang didapat menggunakan *proposed method* tidak terlalu jauh berbeda apabila dibandingkan dengan metode konvensional *Simulation Method*. Tabel 4.6 menjelaskan mengenai perbandingan nilai CCT pada setiap gangguan menggunakan *proposed method* dengan nilai CCT menggunakan *Simulation Method* dengan adanya penambahan *damping*.

Tabel 4.6. Nilai CCT pada Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus dengan *Damping* Menggunakan Referensi COA

Fault	Open Line	Proposed Method			Simulation Method	
		CCT [s]	CPU [s]	CG	CCT [s]	CPU [s]
A	1-4	0,3335	0,2545	G3	0,39-0,4	3,1581
B	4-6	0,2564	0,613	G2	0,25-0,26	2,5336
C	6-7	0,7649	0,321	G2	0,76-0,77	2,4016
D	2-8	0,7985	0,303	G2	0,79-0,8	2,8225
E	9-12	0,6772	0,5244	G2	0,67-0,68	5,6445
F	13-15	0,2191	0,5329	G3	0,21-0,22	3,439
G	15-16	0,4060	0,4634	G3	0,40-0,41	3,2733

Berdasarkan tabel 4.6 dapat juga dilihat perhitungan nilai CCT yang menggunakan *proposed method* tidak jauh berbeda dengan nilai CCT menggunakan metode konvensional *Simulation Method*. Penambahan *damping* pada model generator juga menunjukkan bahwa nilai CCT yang didapatkan menjadi lebih lama. Hal ini merepresentasikan bahwa sistem menjadi lebih stabil. Waktu *running CPU* juga lebih cepat dibandingkan dengan metode konvensional *Simulation Method*.



Gambar 4.7. Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan rad/s , Sudut Rotor (δ), Terhadap Waktu (t) Pada Gangguan di Titik “A” Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus dengan Damping Perhitungan COA

4.2.2 Perhitungan CCT Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus Terhubung pada Bus Infinit

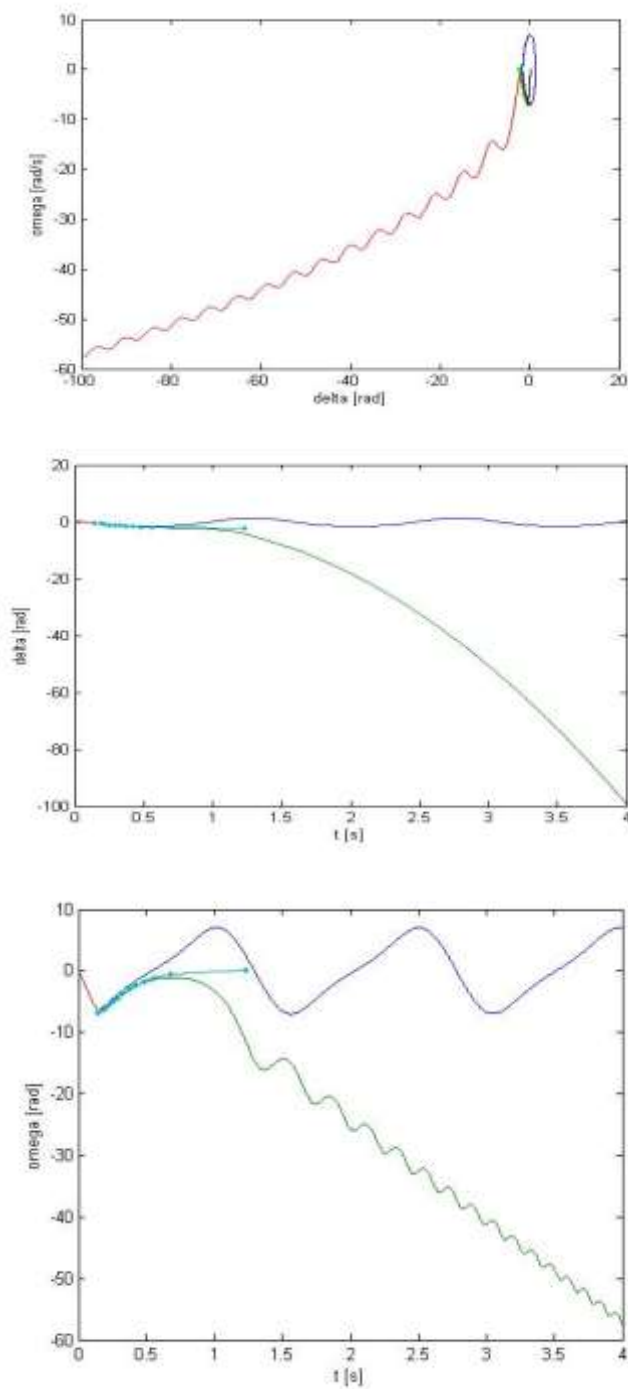
Simulasi perhitungan CCT pada modifikasi Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus terhubung pada bus infinit diuji pada 4 titik gangguan. CCT didapatkan dengan menguji sistem menggunakan *proposed method*. Nilai CCT yang didapatkan akan dibandingkan dengan metode konvensional *Simulation Method* untuk membuktikan keakuratan *proposed method*. Gambar 4.9 merupakan kondisi stabil dan tidak stabil kecepatan sudut (ω) dalam satuan *rad/s*, sudut rotor (δ), terhadap waktu (t), pada gangguan di titik “B” menggunakan *Simulation Method* yang dibandingkan dengan nilai CCT menggunakan *proposed method* tanpa adanya penambahan *damping*.

Pada Gambar 4.8, dapat dilihat bahwa nilai CCT yang didapat menggunakan *proposed method* tidak jauh berbeda jika dibandingkan dengan metode konvensional *Simulation Method*. Tabel 4.7 menunjukkan perbandingan nilai CCT pada setiap gangguan menggunakan *proposed method* dengan nilai CCT menggunakan *Simulation Method* tanpa adanya penambahan *damping*.

Tabel 4.7. Nilai CCT pada Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus Tanpa *Damping* Terhubung pada Bus Infinit

Fault	Open Line	Proposed Method			Simulation Method	
		CCT [s]	CPU [s]	CG	CCT [s]	CPU [s]
B	4-6	0,1481	0,2708	G2	0,14-0,15	3,1815
C	6-7	0,3416	0,2746	G2	0,34-0,35	3,182
D	2-8	0,6300	0,3016	G2	0,63-0,64	3,3438
E	9-12	0,2070	0,4432	G3	0,23-0,24	8,6365
F	13-15	0,1438	0,2938	G3	0,14-0,15	7,002
G	15-16	0,2280	0,2838	G3	0,22-0,23	3,4762

Berdasarkan tabel 4.7 dapat dilihat bahwa nilai CCT menggunakan *proposed method* tidak jauh berbeda dengan nilai CCT menggunakan metode konvensional *Simulation Method*. Selain itu, waktu *running CPU* pada *proposed method* lebih cepat apabila dibandingkan dengan *Simulation Method*.



Gambar 4.8. Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan rad/s , Sudut Rotor (δ), Terhadap Waktu (t) Pada Gangguan di Titik “B” Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus Tanpa Damping dengan Perhitungan Modifikasi Terhubung Bus Infinit

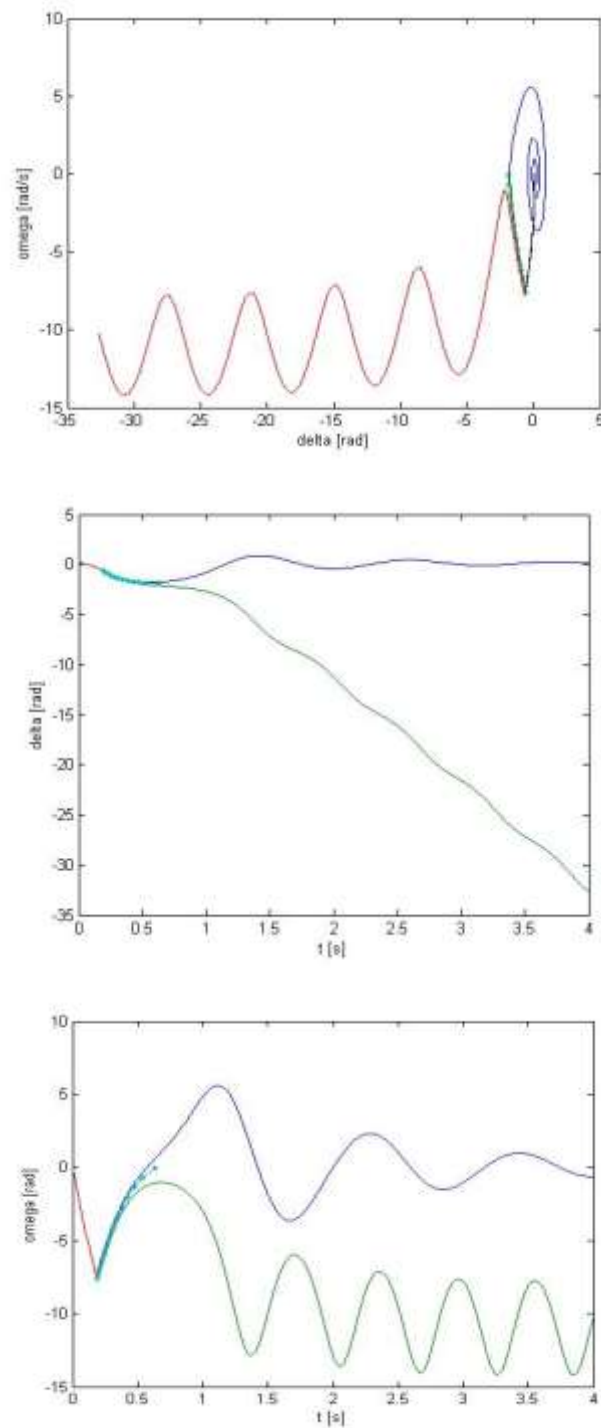
Selanjutnya, sistem diuji dengan adanya penambahan *damping* pada model generator. Nilai CCT yang didapatkan akan dibandingkan dengan metode konvensional *Simulation Method* untuk membuktikan keakuratan *proposed method*. Selanjutnya, Gambar 4.9 menjelaskan kondisi stabil dan tidak stabil kecepatan sudut (ω) dalam satuan *rad/s*, sudut rotor (δ), terhadap waktu (t), pada gangguan di titik “D” menggunakan *Simulation Method* yang dibandingkan dengan nilai CCT menggunakan *proposed method* dengan adanya penambahan *damping*.

Gambar 4.10 menunjukkan bahwa nilai CCT yang didapat menggunakan *proposed method* tidak jauh berbeda jika dibandingkan dengan metode konvensional *Simulation Method*. Pada Tabel 4.8 dapat dilihat perbandingan nilai CCT pada setiap gangguan menggunakan *proposed method* dengan nilai CCT menggunakan *Simulation Method* dengan adanya penambahan *damping*.

Tabel 4.8. Nilai CCT pada Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus dengan *Damping* Terhubung pada Bus Infinit

Fault	Open Line	Proposed Method			Simulation Method	
		CCT [s]	CPU [s]	CG	CCT [s]	CPU [s]
B	4-6	0,1834	0,2427	G2	0,18-0,19	3,3612
C	6-7	0,4602	0,206	G2	0,46-0,47	0,206
D	2-8	1,0651	0,1871	G2	1,05-1,06	3,1806
E	9-12	0,3198	0,4625	G3	0,31-0,32	8,215
F	13-15	0,1974	0,6661	G3	0,19-0,20	6,8345
G	15-16	0,3361	0,2427	G3	0,33-0,34	3,2801

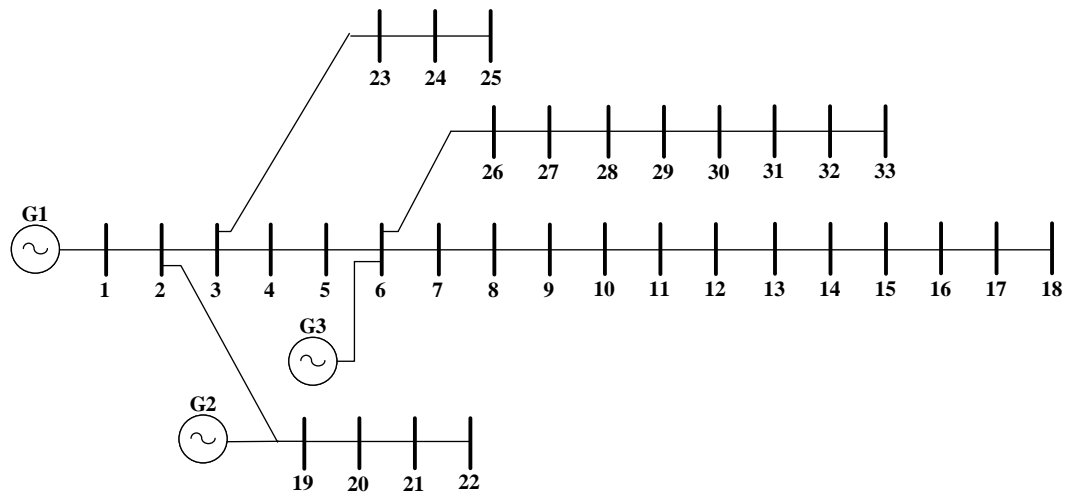
Berdasarkan tabel 4.8 dapat dilihat bahwa nilai CCT menggunakan *proposed method* tidak jauh berbeda dengan nilai CCT menggunakan metode konvensional *Simulation Method*. Penambahan *damping* pada model generator juga menunjukkan bahwa nilai CCT yang didapatkan menjadi lebih lama. Hal ini merepresentasikan bahwa sistem menjadi lebih stabil. Selain itu juga didapatkan waktu *running* CPU lebih cepat dibandingkan dengan metode konvensional *Simulation Method*.



Gambar 4.9. Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan rad/s , Sudut Rotor (δ), Terhadap Waktu (t) Pada Gangguan di Titik “B” Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus Damping dengan Perhitungan Modifikasi Terhubung Bus Infinit

4.3 Perhitungan CCT pada Sistem IEEE 3-Generator 33-Bus

Untuk menguji keakuratan metode, dilakukan simulasi pada modifikasi sistem IEEE 3-generator 33-bus. Sistem multimesin ini terdiri dari 33 bus (1 *slack bus*, 6 *generator bus* dan 36 *load bus*), 32 saluran, serta 3 generator. Gambar 4.10 menunjukkan *single line diagram* modifikasi sistem IEEE 3-generator 33-bus.



Gambar 4.10. Sistem IEEE 3-Generator 33-Bus

Kemudian model generator tersebut diuji pada model sistem berdasarkan referensi *COA/COI*. Selain itu, pada masing-masing model sistem akan dilakukan pengujian dengan adanya penambahan *damping* sebesar 1%. Dengan demikian hasil dari simulasi mampu memberikan gambaran kestabilan sistem pada berbagai model.

Simulasi perhitungan CCT pada modifikasi sistem IEEE 3-generator 33-bus menggunakan referensi COA diuji pada 6 titik gangguan. CCT didapatkan dengan menguji sistem menggunakan *proposed method*. Nilai CCT yang didapatkan akan dibandingkan dengan metode konvensional *Simulation Method* untuk membuktikan keakuratan *proposed method*. Gambar 4.17 merupakan kondisi stabil dan tidak stabil sudut rotor (δ), kecepatan sudut (ω), daya mekanik governor (P_m), pada gangguan di titik “J” menggunakan *Simulation Method* yang dibandingkan

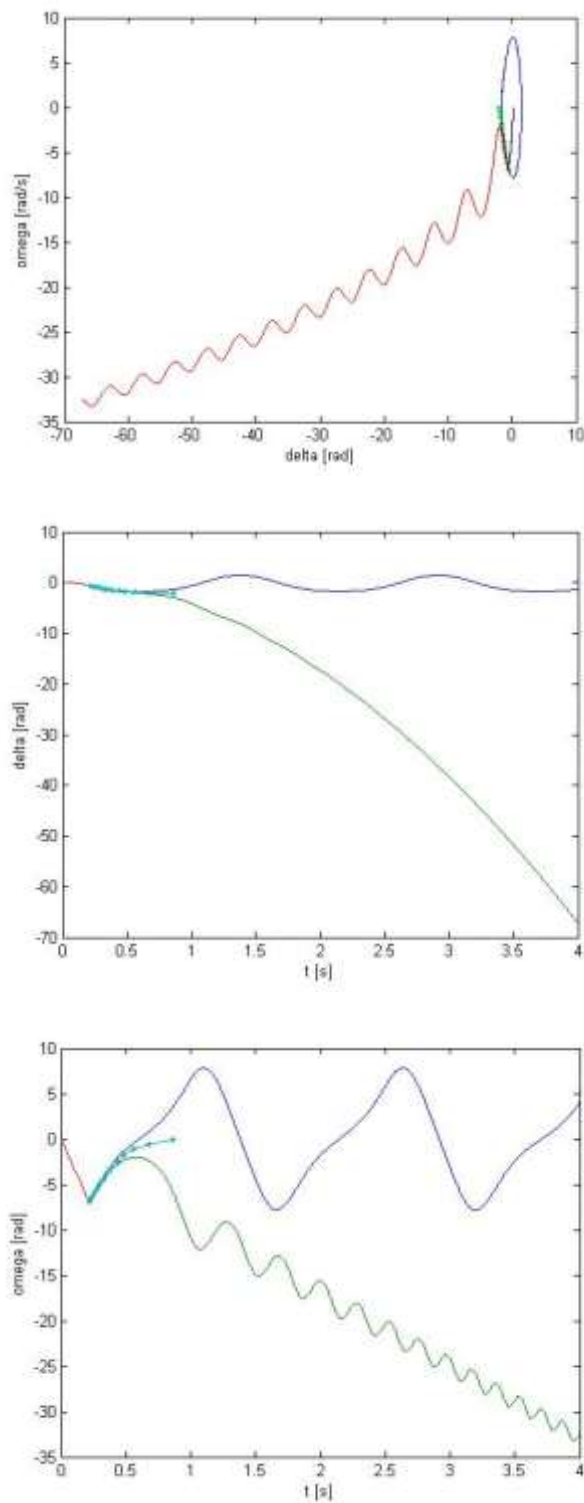
dengan nilai CCT menggunakan *proposed method* tanpa adanya penambahan *damping*.

Berdasarkan gambar 4.11, dapat dilihat bahwa nilai CCT yang didapat menggunakan *proposed method* tidak jauh berbeda jika dibandingkan dengan metode konvensional *Simulation Method*. Tabel 4.23 menunjukkan perbandingan nilai CCT pada setiap gangguan menggunakan *proposed method* dengan nilai CCT menggunakan *Simulation Method* tanpa adanya penambahan *damping*.

Tabel 4.9. Nilai CCT pada Sistem IEEE 3-Generator 33-Bus Tanpa *Damping* Menggunakan Referensi COA

Fault	Open Line	Proposed Method			Simulation Method	
		CCT [s]	CPU [s]	CG	CCT [s]	CPU [s]
A	6-7	0,602	0,3137	G3	0,59-0,6	3,368
B	8-9	0,5131	0,2867	G3	0,51-0,52	2,7257
C	9-10	1,2178	0,23	G3	1,21-1,22	2,731
D	19-20	0,365	0,342	G3	0,36-0,37	2,761
E	3-23	0,6773	0,2866	G3	0,54-0,55	2,718
F	6-26	0,628	0,6231	G3	0,58-0,59	3,2946

Selanjutnya, sistem diuji dengan adanya penambahan *damping* pada model generator. Nilai CCT yang didapatkan akan dibandingkan dengan metode konvensional *Simulation Method* untuk membuktikan keakuratan *proposed method*. Gambar 4.13 merupakan kondisi stabil dan tidak stabil kecepatan sudut (ω) dalam satuan *rad/s*, sudut rotor (δ), terhadap waktu (t), pada gangguan di titik “J” menggunakan *Simulation Method* yang dibandingkan dengan nilai CCT menggunakan *proposed method* dengan adanya penambahan *damping*.



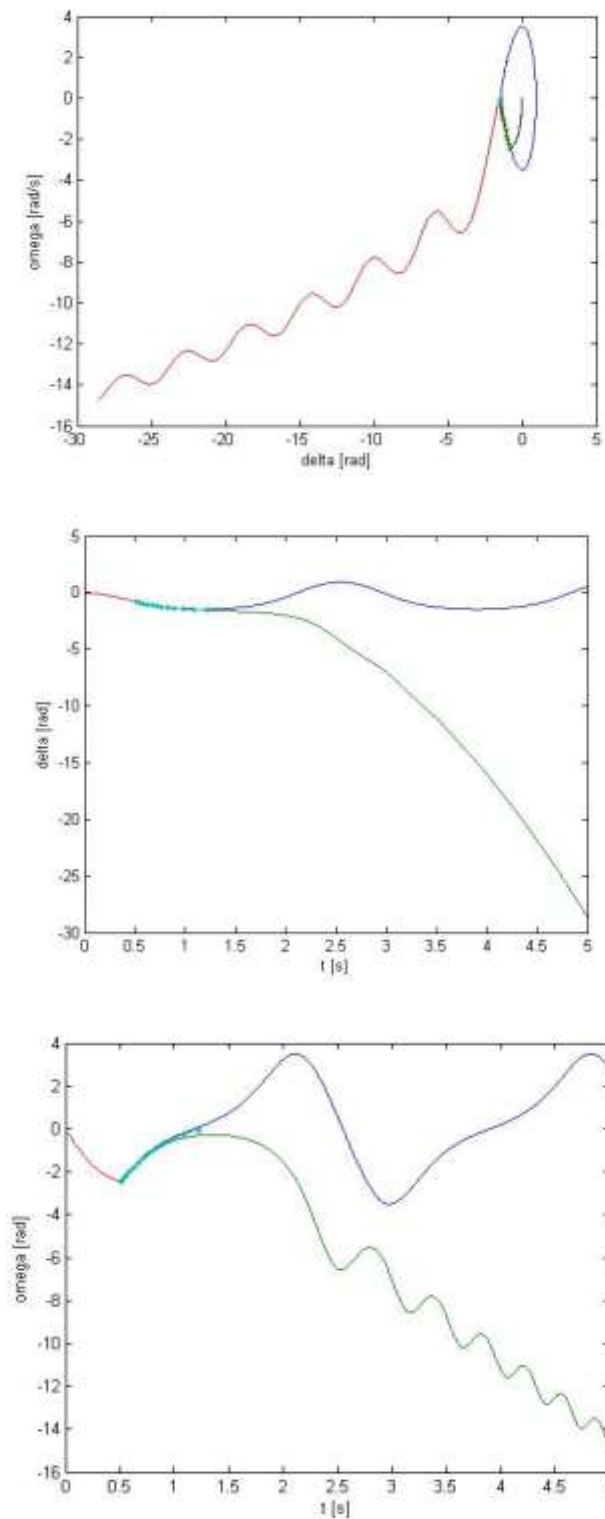
Gambar 4.11. Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan rad/s , Sudut Rotor (δ), Terhadap Waktu (t) Pada Gangguan di Titik “B” Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus Tanpa Damping dengan Menggunakan Perhitungan COA

Berdasarkan gambar 4.12, dapat dilihat bahwa nilai CCT yang didapat menggunakan *proposed method* tidak jauh berbeda jika dibandingkan dengan metode konvensional *Simulation Method*. Tabel 4.10 menunjukkan perbandingan nilai CCT pada setiap gangguan menggunakan *proposed method* dengan nilai CCT menggunakan *Simulation Method* dengan adanya penambahan *damping*.

Tabel 4.10. Nilai CCT pada Sistem IEEE 3-Generator 33-Bus dengan penambahan *Damping* Menggunakan Referensi COA

Fault	Open Line	Proposed Method			Simulation Method	
		CCT [s]	CPU [s]	CG	CCT [s]	CPU [s]
A	6-7	0,6021	0,5048	G3	0,6-0,61	5,8112
B	8-9	0,5131	0,5255	G3	0,51-0,52	5,5768
C	9-10	1,2178	0,2388	G3	1,21-1,22	2,7089
D	19-20	0,3937	0,2911	G3	0,36-0,37	2,1964
E	3-23	0,681	0,2885	G3	0,54-0,55	2,6857
F	6-26	0,6027	0,512	G3	0,59-0,6	8,0179

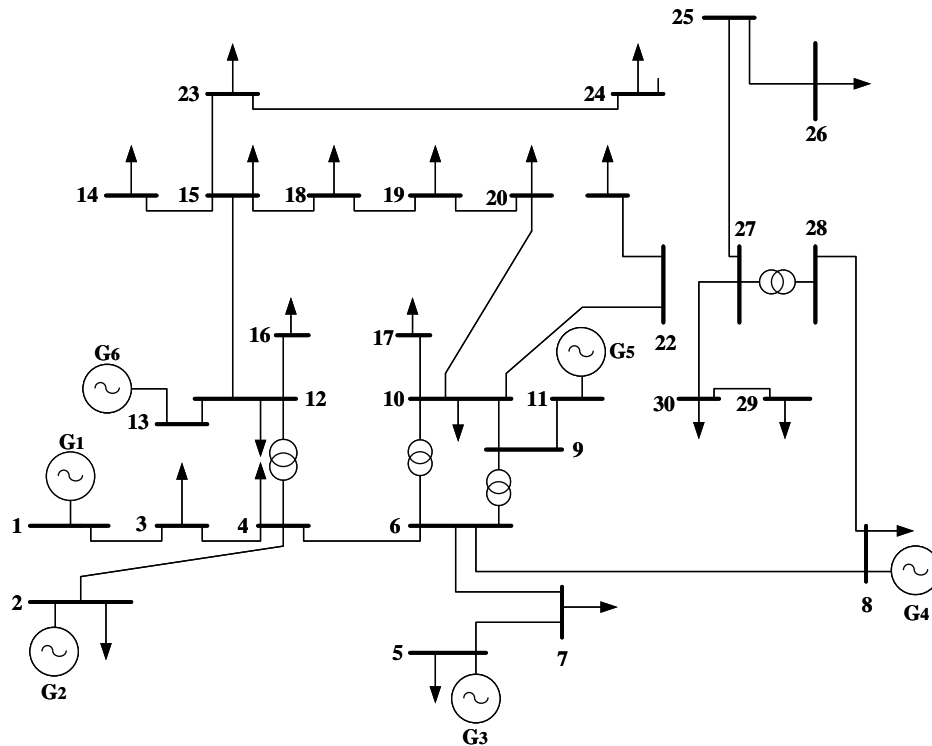
Berdasarkan tabel 4.24 dapat dilihat bahwa nilai CCT yang didapatkan dengan menggunakan *proposed method* tidak jauh berbeda dengan nilai CCT menggunakan metode konvensional *Simulation Method*. Penambahan *damping* pada model generator juga menunjukkan bahwa nilai CCT yang didapatkan menjadi lebih lama, sehingga dengan kata lain sistem menjadi lebih stabil dibandingkan dengan generator tanpa menggunakan *damping*. Kemudian waktu *running CPU* pada *Proposed Method* cepat dibandingkan dengan metode konvensional.



Gambar 4.12. Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan rad/s , Sudut Rotor (δ), Terhadap Waktu (t) Pada Gangguan di Titik “B” Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus dengan Damping dengan Menggunakan Perhitungan COA

4.4 Perhitungan CCT pada Sistem IEEE 6-Generator 30-Bus

Untuk menguji keakuratan metode, dilakukan simulasi pada modifikasi sistem IEEE 3-generator 33-bus. Sistem multimesin ini terdiri dari 33 bus, 6 Generator (1 *slack bus*, 5 *generator bus*, 32 saluran. Gambar 4.13 menunjukkan *single line diagram* modifikasi sistem IEEE 3-generator 33-bus.



Gambar 4.13. Sistem IEEE 6-Generator 30-Bus

Model generator tersebut diuji pada dua model sistem yaitu berdasarkan referensi *COA/COI* dan *Bus Infinit*. Selain itu, pada masing-masing model sistem akan dilakukan pengujian dengan adanya penambahan *damping* sebesar 1%. Dengan demikian hasil dari simulasi mampu memberikan gambaran kestabilan sistem pada berbagai model.

4.4.1 Perhitungan CCT pada Sistem IEEE 6-Generator 30-Bus Menggunakan Referensi COA/COI

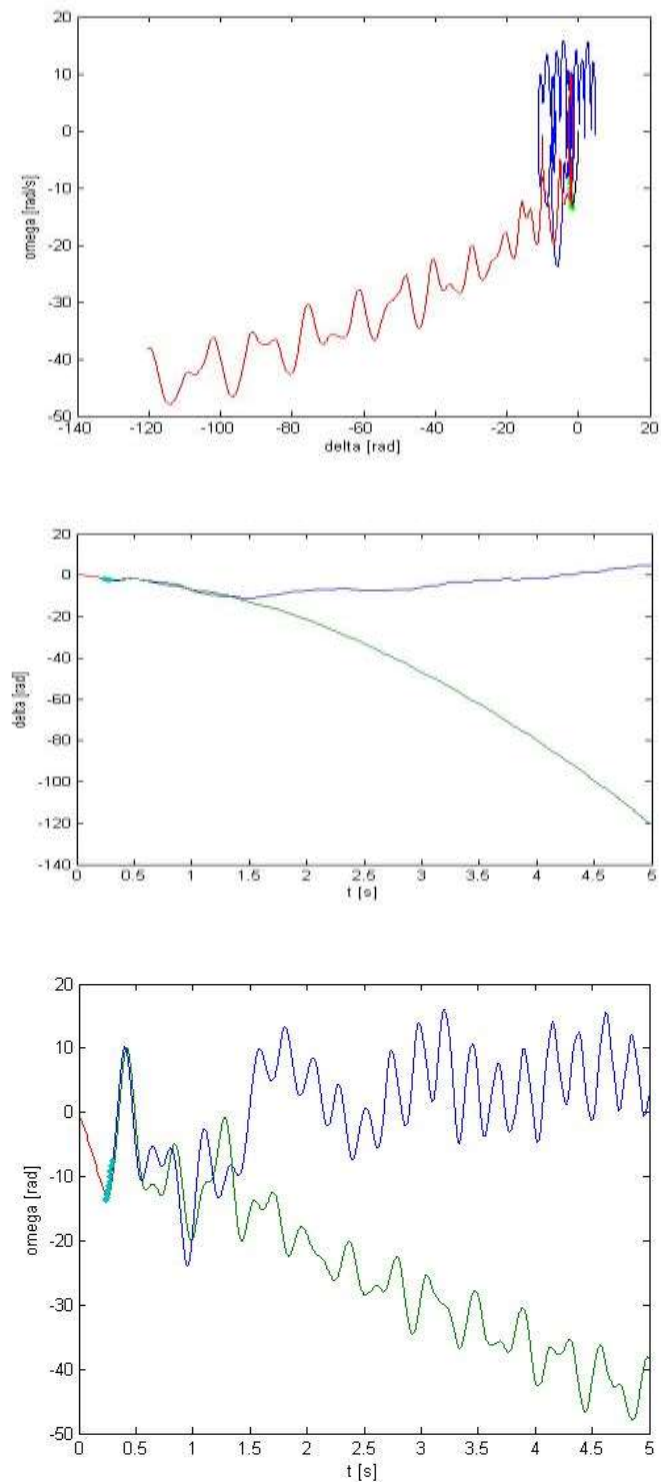
Simulasi perhitungan CCT pada modifikasi sistem IEEE 6-Generator 30-Bus menggunakan referensi COA diuji pada 5 titik gangguan. CCT didapatkan dengan menguji sistem menggunakan *proposed method*. Nilai CCT yang didapatkan akan dibandingkan dengan metode konvensional *Simulation Method* untuk membuktikan keakuratan *proposed method*. Gambar 4.14 merupakan kondisi stabil dan tidak stabil kecepatan sudut (ω) dalam satuan *rad/s*, sudut rotor (δ), terhadap waktu (t), pada gangguan di titik “J” menggunakan *Simulation Method* yang dibandingkan dengan nilai CCT menggunakan *proposed method* tanpa adanya penambahan *damping*.

Gambar 4.15 menunjukkan nilai CCT yang didapat menggunakan *proposed method* tidak terdapat perbedaan yang besar jika dibandingkan dengan metode konvensional *Simulation Method*. Tabel 4.11 menjelaskan perbandingan nilai CCT pada setiap gangguan menggunakan *proposed method* dengan nilai CCT menggunakan *Simulation Method* tanpa adanya penambahan *damping*.

Tabel 4.11. Nilai CCT pada Sistem IEEE 6-Generator 30-Bus Tanpa *Damping* Menggunakan Referensi COA

Fault	Open Line	Proposed Method			Simulation Method	
		CCT [s]	CPU [s]	CG	CCT [s]	CPU [s]
A	8-28	1,7000	0,9846	G3	1,7-1,8	2,5925
B	4-12	0,2234	0,3804	G5	0,21-0,22	1,9385
C	6-9	0,2024	0,4429	G5	0,26-0,27	3,3572
D	6-10	0,2946	0,646	G6	0,30-0,31	2,7214
E	4-6	0,2463	1,8913	G5	0,23-0,24	8,2352

Dapat diamati pada Tabel 4.11 bahwa nilai CCT menggunakan *proposed method* tidak berbeda terlalu jauh apabila dibandingkan dengan nilai CCT menggunakan metode konvensional *Simulation Method*. Selain itu, waktu *running* CPU lebih cepat dibandingkan dengan metode konvensional *Simulation Method*.



Gambar 4.14. Grafik Karakteristik Kecepatan Sudut (ω) Dalam Satuan rad/s , Sudut Rotor (δ), Terhadap Waktu (t) Pada Gangguan di Titik “E” Sistem IEEE 6-Generator 30-Bus Tanpa Damping dengan Menggunakan Perhitungan COA

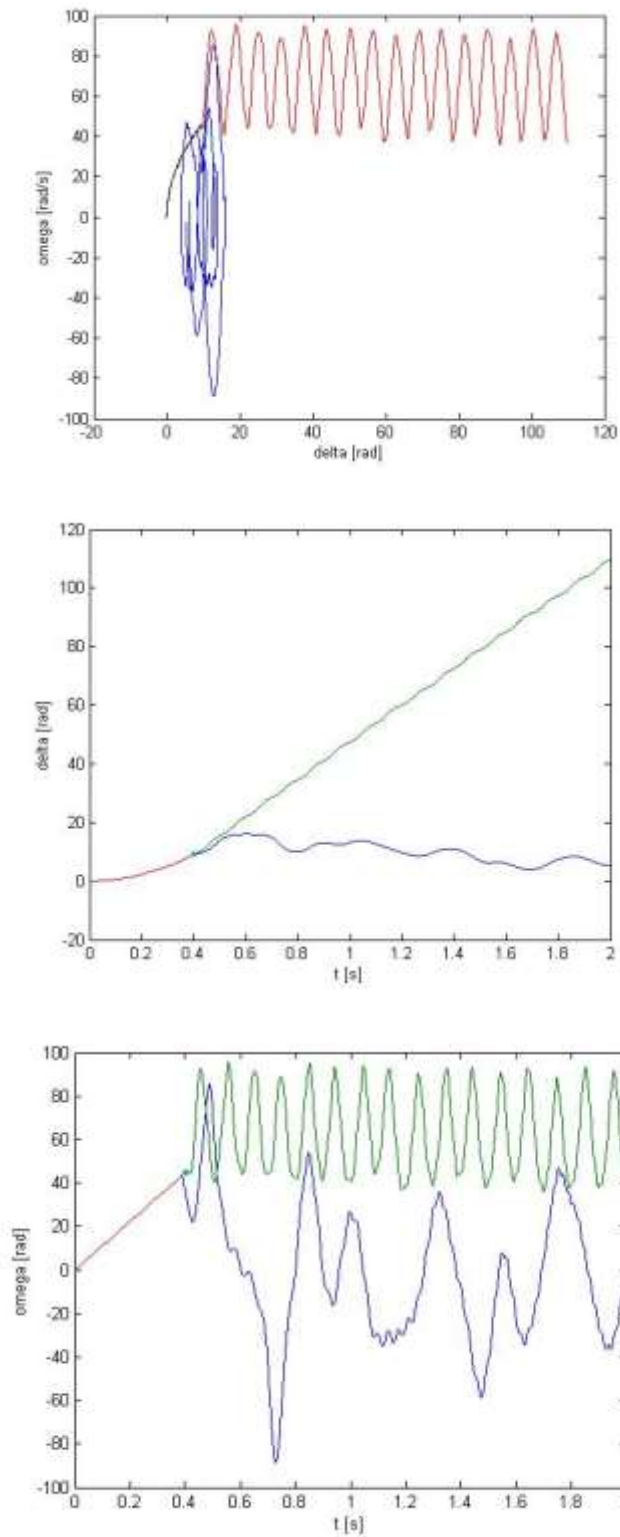
4.4.2 Perhitungan CCT Sistem IEEE 6-Generator 30-Bus Terhubung pada Bus Infinit

Simulasi perhitungan CCT pada modifikasi sistem IEEE 6-generator 30-bus terhubung pada bus infinit diuji pada 2 titik gangguan. Pada gambar 4.15, dapat dilihat bahwa nilai CCT yang didapat menggunakan *proposed method* tidak menghasilkan perbedaan yang signifikan jika dibandingkan dengan metode konvensional *Simulation Method*. Kemudian Tabel 4.12 menunjukkan perbandingan nilai CCT pada setiap gangguan menggunakan *proposed method* dengan nilai CCT menggunakan *Simulation Method* tanpa adanya penambahan *damping*.

Tabel 4.12. Nilai CCT pada Sistem IEEE 6-Generator 30-Bus Tanpa *Damping* Terhubung pada Bus Infinit

Fault	Open Line	Proposed Method			Simulation Method	
		CCT [s]	CPU [s]	CG	CCT [s]	CPU [s]
D	6-10	0,4034	0,6623	G6	0,4-0,41	3,5951
E	4-6	0,1451	0,7041	G5	0,18-0,19	5,0412

Tabel 4 menunjukkan nilai CCT menggunakan *proposed method* tidak terdapat perbedaan yang jauh apabila dibandingkan dengan nilai CCT menggunakan metode konvensional *Simulation Method*. Selain itu, didapatkan waktu *running* CPU untuk perhitungan CCT lebih cepat dengan *proposed method*.



Gambar 4.15. Kondisi Stabil dan Tidak Stabil δ , ω , P_m , dan E Pada Gangguan di Titik “D” pada Modifikasi Sistem IEEE 6-Generator 30-Bus Tanpa *Damping* Terhubung pada Bus Infinit

4.5 Analisis Perhitungan CCT

Simulasi perhitungan CCT pada sistem Fouad dan Anderson 3-generator 9-bus, sistem IEEE 3-generator 16-bus, sistem IEEE 3-generator 33-bus, dan sistem IEEE 6-generotor 30-bus membuktikan bahwa *proposed method* cukup akurat untuk mendapatkan nilai CCT. Selain itu kecepatan rata-rata CPU dalam mendapatkan nilai CCT menggunakan *proposed method* lebih cepat dibandingkan dengan metode konvensional *Simulation Method*. Hal ini ditunjukkan pada Tabel 4.13 sampai Tabel 4.16.

Tabel 4.13. Error dan Kecepatan Rata-rata pada Perhitungan CCT Sistem IEEE 3-Generator 9-Bus

	COA				Infinit	
	Tanpa Damping		Damping		Tanpa Damping	
	CPU [s]	Error [%]	CPU [s]	Error [%]	CPU [s]	Error [%]
Rata-rata	0,3513	4,859	0,333	5,688	0,417	0,098
Maksimum	0,5644	12,458	0,377	12,666	0,643	0,362
Minimum	0,1884	0	0,282	0	0,204	0,001

Tabel 4.14. Error dan Kecepatan Rata-rata pada Perhitungan CCT Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus

	COA				Infinit			
	Tanpa Damping		Damping		Tanpa Damping		Damping	
	CPU [s]	Error [%]	CPU [s]	Error [%]	CPU [s]	Error [%]	CPU [s]	Error [%]
Rata-rata	0,409	1,765	0,430	2,069	0,3113	1,666	0,334	0,080
Maksimum	0,540	8,931	0,613	14,487	0,4432	10	0,666	0,481
Minimum	0,242	0	0,254	0	0,2708	0	0,187	0

Tabel 4.15. *Error dan Kecepatan Rata-rata pada Perhitungan CCT Sistem IEEE 3-Generator 33-Bus*

	COA			
	Tanpa Damping		Damping	
	CPU [s]	Error [%]	CPU [s]	Error [%]
Rata-rata	0,347	4,986	0,393	5,112
Maksimum	0,623	23,145	0,525	23,818
Minimum	0,365	0	0,238	0

Tabel 4.16. *Error dan Kecepatan Rata-rata pada Perhitungan CCT Sistem IEEE 6-Generator 30-Bus*

	COA		Infini	
	Tanpa Damping		Tanpa Damping	
	CPU [s]	Error [%]	CPU [s]	Error [%]
Rata-rata	0,869	5,315	0,683	12,620
Maksimum	1,891	22,153	0,704	23,631
Minimum	0,380	0	0,662	1,609

Berdasarkan tabel 4.13 rata-rata *error* menggunakan *proposed method* sebesar 0,3513% untuk sistem menggunakan referensi COA tanpa *damping* dan 5,688% jika terdapat penambahan *damping* pada model generator. Sedangkan untuk model sistem terhubung bus infinit rata-rata *error* sebesar 0,098% untuk model generator tanpa *damping*. Kecepatan rata-rata CPU untuk menentukan nilai CCT pada setiap titik gangguan sebesar 0,3513 [s] untuk sistem menggunakan referensi COA tanpa *damping* dan 0,333 [s] jika terdapat penambahan *damping* pada model generator. Sedangkan untuk model sistem terhubung bus infinit, kecepatan rata-rata sebesar 0,417 [s] untuk model generator tanpa *damping*.

Kemudian tabel 4.14 menunjukkan rata-rata *error* dengan menggunakan *proposed method* yaitu sebesar 0,409% untuk sistem menggunakan referensi COA tanpa *damping* dan 0,430% jika terdapat penambahan *damping* pada model generator. Sedangkan untuk model sistem terhubung bus infinit rata-rata *error* sebesar 1,66% untuk model generator tanpa *damping* dan 0,080% dengan *damping*.

. Kecepatan rata-rata CPU untuk menentukan nilai CCT pada setiap titik gangguan sebesar 0,409 [s] untuk sistem menggunakan referensi COA tanpa *damping* dan 0,430 [s] jika terdapat penambahan *damping* pada model generator. Sedangkan untuk model sistem terhubung bus infinit, kecepatan rata-rata sebesar 0,3113 [s] untuk model generator tanpa *damping* dan 0,334 [s] untuk model generator dengan *damping*.

Rata-rata *error* menggunakan *proposed method*, berdasarkan tabel 4.15, yaitu sebesar 0,347% untuk sistem menggunakan referensi COA tanpa *damping* dan 0,393% jika terdapat penambahan *damping* pada model generator. Kecepatan rata-rata CPU untuk menentukan nilai CCT pada setiap titik gangguan sebesar 0,347 [s] untuk sistem menggunakan referensi COA tanpa *damping* dan 0,393 [s] jika terdapat penambahan *damping* pada model generator.

Tabel 4.16 menunjukkan rata-rata *error* menggunakan *proposed method* sebesar 0,869% untuk sistem menggunakan referensi COA tanpa *damping*. Sedangkan untuk model sistem terhubung bus infinit rata-rata *error* sebesar 12,620% untuk model generator tanpa *damping*. Kecepatan rata-rata CPU untuk menentukan nilai CCT pada setiap titik gangguan sebesar 0,683 [s] untuk sistem menggunakan referensi COA tanpa *damping*. Sedangkan untuk model sistem terhubung bus infinit, kecepatan rata-rata sebesar 0,683 [s] untuk model generator tanpa *damping*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang didapatkan dari simulasi dan analisis pada tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Metode perhitungan CCT menggunakan persamaan hilangnya sinkronisasi pada multimesin cukup akurat. Untuk Sistem IEEE 3-Generator 9-Bus rata-rata *error* menggunakan *proposed method* sebesar 0,3513% untuk sistem menggunakan referensi COA tanpa *damping* dan 5,688% jika terdapat penambahan *damping*. Sedangkan untuk model sistem terhubung bus infinit rata-rata *error* sebesar 0,098% untuk model generator tanpa *damping*. Kemudian Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus menunjukkan rata-rata *error* dengan menggunakan *proposed method* yaitu sebesar 0,409% untuk sistem menggunakan referensi COA tanpa *damping* dan 0,430% jika terdapat penambahan *damping*. Sedangkan untuk model sistem terhubung bus infinit rata-rata *error* sebesar 1,66% untuk model generator tanpa *damping* dan 0.080% dengan *damping*. Rata-rata *error* menggunakan *proposed method* pada Sistem IEEE 3-Generator 33-Bus, yaitu sebesar 0,347% untuk sistem menggunakan referensi COA tanpa *damping* dan 0,393% jika terdapat penambahan *damping* pada model generator. Sistem IEEE 6-Generator 30-Bus menunjukkan rata-rata *error* menggunakan *proposed method* sebesar 0,869% untuk sistem menggunakan referensi COA tanpa *damping*. Sedangkan untuk model sistem terhubung bus infinit rata-rata *error* sebesar 12,620% untuk model generator tanpa *damping*.
2. Metode perhitungan CCT menggunakan persamaan modifikasi keadaan hilang sinkronisasi pada multimesin dapat menghitung lebih cepat bila dibandingkan dengan metode konvensional. Hal ini ditunjukkan dengan rata-rata kecepatan CPU menggunakan metode yang diusulkan antara lain: pada sistem IEEE 3-Generator 9-Bus kecepatan rata-rata CPU untuk menentukan nilai CCT pada setiap titik gangguan sebesar 0,3513 [s] untuk

sistem menggunakan referensi COA tanpa damping dan 0,333 [s] jika terdapat penambahan damping. Sedangkan untuk model sistem terhubung bus infinit, kecepatan rata-rata sebesar 0,417 [s] untuk generator tanpa damping. Kemudian sistem IEEE 3-Generator 16-Bus, kecepatan rata-rata CPU untuk menentukan nilai CCT pada setiap titik gangguan sebesar 0,409 [s] untuk sistem menggunakan referensi COA tanpa damping dan 0,430 [s] jika terdapat penambahan damping pada generator. Untuk model sistem terhubung bus infinit, kecepatan rata-rata sebesar 0,3113 [s] untuk model generator tanpa damping dan 0,334 [s] untuk model generator dengan damping. Pada sistem IEEE 3-Generator 33-Bus kecepatan rata-rata CPU untuk menentukan nilai CCT pada setiap titik gangguan sebesar 0,347 [s] untuk sistem menggunakan referensi COA tanpa damping, dan memiliki kecepatan 0,393 [s] jika terdapat penambahan damping pada model generator. Selanjutnya yaitu sistem IEEE 6-Generator 30-Bus memiliki kecepatan rata-rata CPU 0,683 [s] untuk sistem menggunakan referensi COA tanpa damping Sedangkan untuk model sistem terhubung bus infinit, kecepatan rata-rata sebesar 0,683 [s] untuk model generator tanpa damping.

3. Pada generator yang diberi penambahan damping berpengaruh pada nilai CCT yang lebih lama dibandingkan dengan model generator tanpa damping, sehingga hal tersebut dapat diartikan sistem menjadi lebih stabil.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Yorino, N., Priyadi, A., Ridzuan, B.A. M. , Sasaki, Y., Zoka, Y., Sugihara, H., “*Direct Computation of Critical Clearing Time for Transient Stability Analysis*”, Proceeding on 17th PSCC, Stockholm, Sweden, August 22-26, 2011.
- [2] M. Ribbens-Pavella and F.J. Evans, “*Direct methods for studying dynamics of large-scale electric power systems – A Survey* ” Automatica vol-32, January, 1985, pp.1-21.
- [3] A.A. Fouad and V. Vittal, “*The transient energy function method*”, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 10, No. 4, Oct. 1988, pp. 233-246.
- [4] IEEE Power Engineering Society: “*Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools*”, Power System Stability Subcommittee Special Publication, 2003, SP101PSS.
- [5] Priyadi, A., Yorino, N., Tanaka, M., Fujiwara, T., Zoka, Y., Kakui, H., and Takeshita, M., “*A Direct Method for Obtaining Critical Clearing Time for Transient Stability Using Critical Generator Conditions*” European Transactions on Electrical Power, July 2011
- [6] Nouredine and Sabonnadiere, “*SMART GRID*”, Wiley, 2012.
- [7] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, “*Definition and Classification of Power System Stability*,” IEEE Transaction on Power System, Vol.19, No.2, May. 2004.
- [8] Yorino, Naoto, Ardyono Priyadi, Hironori Kakui, and Mitsuhiro Takeshita. “*A New Method for Obtaining Critical Clearing Time for Transient Stability*”, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 25, No. 3, August 2010.
- [9] IEEE Std 242-2001™, “*IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, Ch. 15, 2001.
- [10] Kundur, P, Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [11] Yorino, Naoto, Takeshi Saito, Hironori Kakui, and Mitsuhiro Takeshita. “*A New Method for Transient Stability*”, Electrical Engineering in Japan, Vol. 159, No. 3, 2007

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Data Bus Sistem Fouad-Anderson 3-Generator 9-Bus

No Bus	P Generator (MW)	Q Generator (MVAR)	P Beban (MW)	Q Beban (MVAR)	Shunt Capacitor
1	1,04	200	0	0	0
2	1,025	163	0	0	0
3	1,025	85	0	0	0
4	1	0	0	0	0
5	1	0	0	150	50
6	1	0	0	100	30
7	1	0	0	0	0
8	1	0	0	125	35
9	1	0	0	0	0

Data Transmisi Sistem Fouad-Anderson 3-Generator 9-Bus

No Line	Dari Bus	Menuju Bus	R	X	Half Line Charging Susceptance (pu)
1	1	4	0	0,0576	0
2	2	7	0	0,0625	0
3	3	9	0	0,0586	0
4	4	5	0,01	0,085	0,088
5	4	6	0,017	0,092	0,079
6	5	7	0,032	0,161	0,153
7	6	9	0,039	0,17	0,179
8	7	8	0,0085	0,072	0,0745
9	8	9	0,0119	0,1008	0,1045

Data Transmisi Sistem Fouad-Anderson 3-Generator 9-Bus

No Bus	P Generator (MW)	Q Generator (MVAR)	P Beban (MW)	Q Beban (MVAR)	Shunt Capacitor
1	1,025	10	5	0	0
2	1,03	20	15	0	0
3	1,025	10	5	0	0
4	1	0	0	2	1,6
5	1	0	0	3	1,5
6	1	0	0	2	0,8
7	1	0	0	1,5	1,2
8	1	0	0	4	2,7

No Bus	P Generator (MW)	Q Generator (MVAR)	P Beban (MW)	Q Beban (MVAR)	Shunt Capacitor
9	1	0	0	5	3
10	1	0	0	1	0,9
11	1	0	0	0,6	0,1
12	1	0	0	4,5	2
13	1	0	0	1	0,9
14	1	0	0	1	0,7
15	1	0	0	1	0,9
16	1	0	0	2,1	1

Data Transmisi Sistem IEEE 3-Generator 16-Bus

No Line	Dari Bus	Menuju Bus	R	X	Half Line Charging Susceptance (pu)
1	1	8	0,075	0,1	0
2	2	4	0,11	0,11	0
3	3	13	0,11	0,11	0
4	4	5	0,08	0,11	0
5	4	6	0,09	0,18	0
6	5	11	0,04	0,04	0
7	6	7	0,04	0,04	0
8	8	9	0,08	0,11	0
9	8	10	0,11	0,11	0
10	9	11	0,11	0,11	0
11	9	12	0,08	0,11	0
12	10	14	0,04	0,04	0
13	13	14	0,09	0,12	0
14	13	15	0,08	0,11	0
15	15	16	0,04	0,04	0

Data Bus Sistem IEEE 6-Generator 30-Bus

No Bus	P Generator (MW)	Q Generator (MVAR)	P Beban (MW)	Q Beban (MVAR)	Shunt Capacitor
1	1,06	26,02	0	0	0
2	1,045	4	5	2,17	1,27
3	1	0	0	0,24	0,12

No Bus	P Generator (MW)	Q Generator (MVAR)	P Beban (MW)	Q Beban (MVAR)	Shunt Capacitor
4	1	0	0	0,76	0,16
5	1,01	0	3,7	9,42	1,9
6	1	0	0	0	0
7	1	0	0	2,28	1,09
8	1,01	0	3,73	3	3
9	1	0	0	0	0
10	1	0	0	0,58	0,2
11	1,082	0	1,62	0	0
12	1	0	0	1,12	0,75
13	1,071	0	1,06	0	0
14	1	0	0	0,62	0,16
15	1	0	0	0,82	0,25
16	1	0	0	0,35	0,18
17	1	0	0	0,9	0,58
18	1	0	0	0,32	0,09
19	1	0	0	0,95	0,34
20	1	0	0	0,22	0,07
21	1	0	0	1,75	1,12
22	1	0	0	0	0
23	1	0	0	0,32	0,16
24	1	0	0	0,87	0,67
25	1	0	0	0	0
26	1	0	0	0,35	0,23
27	1	0	0	0	0
28	1	0	0	0	0
29	1	0	0	0,24	0,09
30	1	0	0	1,06	0,19

Data Transmisi Sistem IEEE 6-Generator 30-Bus

No Line	Dari Bus	Menuju Bus	R	X	Half Line Charging Susceptance (pu)
1	1	2	0,0192	0,0575	0,0264
2	1	3	0,0452	0,1852	0,0204
3	2	4	0,057	0,1737	0,0184
4	3	4	0,0132	0,0379	0,0042
5	2	5	0,0472	0,1983	0,0209
6	2	6	0,0581	0,1763	0,0187
7	4	6	0,0119	0,0414	0,0045

No Line	Dari Bus	Menuju Bus	R	X	Half Line Charging Susceptance (pu)
8	5	7	0,046	0,116	0,0102
9	6	7	0,0267	0,082	0,0085
10	6	8	0,012	0,042	0,0045
11	6	9	0	0,208	0
12	6	10	0	0,556	0
13	9	11	0	0,208	0
14	4	12	0	0,256	0
15	12	13	0	0,14	0
16	12	14	0,1231	0,2559	0
17	12	15	0,0662	0,1304	0
18	12	16	0,0945	0,1987	0
19	14	15	0,221	0,1997	0
20	16	17	0,0824	0,1923	0
21	15	18	0,107	0,2185	0
22	18	19	0,0639	0,1292	0
23	19	20	0,034	0,068	0
24	10	20	0,0936	0,209	0
25	10	17	0,0324	0,0845	0
26	10	21	0,0348	0,0749	0
27	10	22	0,0727	0,1499	0
28	21	22	0,0116	0,0236	0
29	15	23	0,1	0,202	0
30	22	24	0,115	0,179	0
31	23	24	0,132	0,27	0
32	24	25	0,1885	0,3292	0
33	25	26	0,2544	0,38	0
34	25	27	0,1093	0,2087	0
35	27	28	0	0,396	0
36	27	29	0,2198	0,4153	0
37	27	30	0,3202	0,6027	0
38	29	30	0,2399	0,4533	0
39	8	28	0,0636	0,2	0,0214
40	6	28	0,0169	0,0599	0,0065
41	9	10	0	0,11	0

Data Bus Sistem IEEE 3-Generator 33-Bus

No Bus	P Generator (MW)	Q Generator (MVAR)	P Beban (MW)	Q Beban (MVAR)	Shunt Capacitor
1	1,02	2	0	0	0
2	1	0	0	0,1	0,06
3	1	0	0	0,9	0,04
4	1	0	0	0,12	0,08
5	1	0	0	0,06	0,03
6	1,06	1,3	0	0,06	0,02
7	1	0	0	0,2	0,1
8	1	0	0	0,2	0,1
9	1	0	0	0,06	0,02
10	1	0	0	0,06	0,02
11	1	0	0	0,045	0,03
12	1	0	0	0,06	0,035
13	1	0	0	0,06	0,035
14	1	0	0	0,12	0,08
15	1	0	0	0,06	0,01
16	1	0	0	0,06	0,02
17	1	0	0	0,06	0,02
18	1	0	0	0,09	0,04
19	1,05	2	0	0,09	0,04
20	1	0	0	0,09	0,04
21	1	0	0	0,09	0,04
22	1	0	0	0,09	0,04
23	1	0	0	0,09	0,05
24	1	0	0	0,42	0,2
25	1	0	0	0,42	0,2
26	1	0	0	0,06	0,025
27	1	0	0	0,06	0,025
28	1	0	0	0,06	0,02
29	1	0	0	0,12	0,07
30	1	0	0	0,2	0,6
31	1	0	0	0,15	0,07
32	1	0	0	0,21	0,1
33	1	0	0	0,06	0,04

Data Transmisi Sistem IEEE 3-Generator 33-Bus

No Line	Dari Bus	Menuju Bus	R	X	Half Line Charging Susceptance (pu)
1	1	2	0,0922	0,047	0
2	2	3	0,493	0,2511	0
3	3	4	0,366	0,1864	0
4	4	5	0,3811	0,1941	0
5	5	6	0,819	0,707	0
6	6	7	0,1872	0,6188	0
7	7	8	0,7144	0,2351	0
8	8	9	1,03	0,74	0
9	9	10	1,044	0,74	0
10	10	11	0,1966	0,065	0
11	11	12	0,3744	0,1238	0
12	12	13	1,468	1,155	0
13	13	14	0,5416	0,7129	0
14	14	15	0,591	0,526	0
15	15	16	0,7463	0,545	0
16	16	17	1,289	1,721	0
17	17	18	0,732	0,574	0
18	2	19	0,164	0,1565	0
19	19	20	1,5042	1,3554	0
20	20	21	0,4095	0,4784	0
21	21	22	0,7089	0,9373	0
22	3	23	0,4512	0,3083	0
23	23	24	0,898	0,7091	0
24	24	25	0,896	0,7011	0
25	6	26	0,203	0,1034	0
26	26	27	0,2842	0,1447	0
27	27	28	1,059	0,9337	0
28	28	29	0,8042	0,7006	0
29	29	30	0,5075	0,2585	0
30	30	31	0,9744	0,9693	0
31	31	32	0,3105	0,3619	0
32	32	33	0,341	0,5302	0

DAFTAR INDEX

A

Admitansi elemen matriks, 28
Aliran daya, 3, 25, 26, 27

C

Center of Angle, Center of Inertia, COA, COI, 23, 24, 61, 62
Circuit Breaker, CB, 2, 3, 8, 10, 32
Critical Clearing Time, CCT, 2, 3, 8, 31, 32

D

Daya Aktif, P, 25, 26, 27, 28
Daya Reaktif, Q, 25, 26, 27, 28
Daya Semu, 16, 22, 23
Daya Mekanis, 25, 48
Daya Elektris, 25
Distributed Generator, 30
Damping, 6, 19, 22, 25

E

Eigenvector, 14
End Point, 13, 14, 17

I

Infinite Bus, 13, 23

Inersia, Konstanta Inersia, 10, 19, 20, 21, 22, 23, 25

J

Jacobian Matrik, 3, 14, 16, 17, 18, 27

K

Kecepatan Sudut, 10, 21, 22, 33
Kecepatan base, 10
Kestabilan Transient, 1, 2, 3, 5, 6, 10
Konstanta Kontrol, 10

L

Lossing of Synchronization, 2, 3, 6

M

Micro Hydro, 8, 30
Modifikasi Hilang Singkronisasi, 13, 14

N

Newton Raphson, 17, 18, 28

P

Perumusan minimalisasi, 15

R

Reaktansi, 25

Reduksi Matrik 28

Reduksi Kron, 28

Referensi Gerak Berputar Sinkron,
19

Runge-Kutta 4th Order, 12

Renewable Energy 8, 30

S

Simulation Method, 7, 10, 11, 61

Swing Equation, 18

Sudut Fasa Internal, 10

Smart Grid, 2, 3, 7, 8, 30

Sudut Rotor 5, 6, 13, 23

Stable Equilibrium Point, SEP, 6

T

Torsi Elektris, 5, 18

Torsi Mekanis, 5, 18

Trajectory, Trajectory Kritis, 6, 7,
10, 11, 12, 13, 14

Trapezoidal, 11, 13

U

Unstable Equilibrium Point, UEP, 7,
11, 12, 13, 14, 16

W

Waktu Kritis, 7, 12

RIWAYAT HIDUP



Isa Hafidz, dilahirkan di kota Surabaya, Jawa Timur pada 28 Mei 1992. Penulis adalah putra dari pasangan Muhammad Saechu dan Danarti Setiyowati. Memulai jenjang pendidikan di TK Al-Kautsar, kemudian melanjutkan pendidikan formal di SDN Pekuncen Kota Pasuruan, SMPN 3 Kota Pasuruan, dan SMAN 1 Kota Pasuruan hingga lulus pada tahun 2010. Penulis menyelesaikan gelar sarjana teknik pada tahun 2015, dan magister pada tahun 2017 di Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan konsentrasi studi Sistem Tenaga. Selain kegiatan organisasi Tim Robot ITS, penulis juga aktif sebagai asisten koordinator asisten di Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga, anggota aktif kegiatan sosial Menyapa Indonesia, Awardee LPDP, dan sebagai konsultan di ITS Kemitraan. Penulis juga aktif pada penelitian di bidang Teknik Sistem Tenaga dan dapat dihubungi melalui email isahafidz@gmail.com.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

